

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| Тема работы |
|---|
| Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного МОХ-топлива |

УДК 621.039.543:66.011:533.9

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| 0AM91 | Расторгуев Вячеслав Игоревич | | |

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ОЯТЦ ИЯТШ | Каренгин А.Г. | к.ф.-м.н. | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН ШБИП | Киселева Е.С. | к.э.н. | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ОЯТЦ ИЯТШ | Тимченко С.Н. | к.т.н. | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--|----------------|---------------------------|---------|------|
| Изотопные технологии и материалы | Дорофеева Л.И. | к.ф.-м.н. | | |

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

| Код компетенции | Результаты освоения ООП (компетенции) |
|-------------------------------------|---|
| Универсальные | |
| УК(У)-1 | Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий |
| УК(У)-2 | Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла |
| УК(У)-3 | Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели |
| УК(У)-4 | Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия |
| УК(У)-5 | Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия |
| УК(У)-6 | Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки |
| Общепрофессиональные | |
| ОПК(У)-1 | Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач |
| ОПК(У)-2 | Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы |
| ОПК(У)-3 | Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ |
| Профессиональные компетенции | |
| ПК(У)-1 | Способен использовать фундаментальные законы в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения |
| ПК(У)-2 | Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии |
| ПК(У)-3 | Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов |
| ПК(У)-4 | Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах |
| ПК(У)-5 | Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета |
| ПК(У)-6 | Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов |
| ПК(У)-7 | Способен формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов |
| ПК(У)-8 | Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение |
| ПК(У)-9 | Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО) |
| ПК(У)-10 | Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии |

| | |
|--|--|
| Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов | При разработке магистерской диссертации должны быть рассмотрены следующие вопросы: 1. Обзор и анализ физических методов получения наноразмерных порошков 2. Определение оптимальных составов водно-органических нитратных растворов 3. Термодинамическое моделирование равновесных составов продуктов плазмохимического синтеза 4. Подготовка экспериментального плазменного стенда 5. Подготовка модельных прекурсоров и проведение экспериментов с получением опытной партии порошка 6. Исследование и анализ свойств полученного порошка, синтезированного в плазме ВЧФ-разряда 7. Экономическое обоснование проведения НИР 8. Выводы по работе. Заключение |
|--|--|

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

| Раздел | Консультант |
|--|---------------|
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: | Киселева Е.С. |
| Социальная ответственность | Тимченко С.Н. |
| Иностранный язык | Шайкина О.И. |

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику

01.22.2021

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОЯТЦ ИЯТШ | Каренгин А.Г. | к.ф.-м.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| 0AM91 | Расторгуев Вячеслав Игоревич | | |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| | |
|---------------|---------------------------------|
| Группа | ФИО |
| 0AM91 | Расторгуеву Вячеславу Игоревичу |

| | | | |
|---------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Школа | ИЯТШ | Отделение школы (НОЦ) | ОЯТЦ |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | 14.04.02 Ядерные физика и технологии |

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

| | |
|--|---|
| <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> | 1.Стоимость расходных материалов; 2.Норматив заработной платы. |
| <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i> | Коэффициенты для расчета заработной платы. |
| <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i> | Отчисления во внебюджетные фонды (30,2%). |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|---|---|
| <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i> | 1.Потенциальные потребители результатов исследования; 2.Анализ конкурентных технических решений; 3.SWOT – анализ. |
| <i>Разработка устава научно-технического проекта</i> | 1.Цели и результат проекта. 2.Организационная структура проекта. 3.Ограничения и допущения проекта. |
| <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i> | 1.Структура работ в рамках научного исследования; 2.Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования; 3.Расчет бюджета научно - технического исследования (НТИ). |
| <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i> | 1.Определение интегрального финансового показателя разработки; 2.Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3.Определение интегрального показателя эффективности. |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

| |
|---|
| 1. «Портрет» потребителя результатов НТИ 2. Сегментирование рынка 3. Оценка конкурентоспособности технических решений 4. Матрица SWOT 5. Диаграмма Ганта 6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ |
|---|

| | |
|---|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | |
|---|--|

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Доцент ОСГН ШБИП | Киселева Елена Станиславовна | к.э.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|------------------------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 0AM91 | Расторгуев Вячеслав Игоревич | | |

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|--------------------------------|
| 0АМ91 | Расторгуев Вячеславу Игоревичу |

| Школа | ИЯТШ | Отделение школы (НОЦ) | ОЯТЦ |
|---------------------|--------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | 14.04.02 Ядерные физика и технологии |

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

| | |
|--|--|
| 1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения: | <ul style="list-style-type: none"> – Вредных проявлений факторов производственной среды: микроклимат, шум, вибрация, освещение, электромагнитные поля и ионизирующее излучение от ПЭВМ, вредные вещества; – опасных проявлений факторов производственной среды: электрического тока, пожарная и взрывная безопасность; |
| 2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме | <ul style="list-style-type: none"> – требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – Требования охраны труда при работе на ВЧФ-плазмотроне; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – радиационная безопасность; – химическая безопасность. |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке: | |
| 1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: | <ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные). |
| 2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности | <ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (причины, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). |

| | |
|--|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | |
|--|--|

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|----------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОЯТЦ ИЯТШ | Тимченко Сергей Николаевич | к.т.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| 0АМ91 | Расторгуев Вячеслав Игоревич | | |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| РЕФЕРАТ | 10 |
| ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ | 11 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 12 |
| 1 Обзор литературы | 13 |
| 1.1 Дисперсионное ядерное топливо | 13 |
| 1.1.1 Материалы матрицы дисперсионного ядерного топлива..... | 13 |
| 1.1.2 Матричные материалы в виде оксидов металлов..... | 15 |
| 1.2 Методы получения дисперсионного топлива..... | 21 |
| 1.2.1 Диспергационные методы | 21 |
| 1.2.2 Метод разложения термически нестойких солей..... | 22 |
| 1.2.2 Конденсационный метод | 23 |
| 1.2.2 Химическая конденсация | 23 |
| 1.2.3 Химические растворные методы | 24 |
| 1.2.4 Золь-гель – метод | 24 |
| 1.2.5 Метод гидротермального синтеза..... | 25 |
| 1.2.6 Пиролиз полимерно-солевых композиций | 25 |
| 1.2.7 Плазмохимические способы | 26 |
| 1.2.8 Переработка газообразных соединений в плазме | 27 |
| 1.2.9 Переработка капельно-жидкого сырья..... | 28 |
| 1.2.10 Переработки твердых частиц, взвешенных в потоке плазмы | 29 |
| 1.3 Оксид плутония и смешанное уран-плутониевое оксидное топливо..... | 30 |
| 1.3.1 Получение смешанного оксидного топлива | 32 |
| 1.3.2 Изготовление таблеток | 32 |
| 1.3.3 Поведение PuO_2 и $PuO_2 - UO_2$ под облучением | 35 |
| 1.3.4 Применение PuO_2 и $(U,Pu) O_2$ в ядерных реакторах | 37 |
| 2 Расчетная часть..... | 39 |
| 2.1 Расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов и определение оптимальных составов. | 39 |
| 2.2 Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки растворов ВОНР | 41 |
| 3 Экспериментальная часть..... | 44 |
| 3.1 Лабораторный стенд для проведения исследований | 44 |
| 3.2 Определение расхода плазмообразующего газа через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона.... | 45 |
| 3.2 Расчет расхода газа через реактор | 48 |
| 3.3 Расчет основных технологических параметров установки | 49 |
| 3.4 Плазмохимическая переработка модельных растворов | 50 |

| | |
|--|----|
| 3.5 Анализ полученных результатов | 51 |
| 3.6 Выводы..... | 58 |
| 3.7 Заключение | 59 |
| 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | 60 |
| 4.1 Потенциальные потребители результатов исследования | 60 |
| 4.2 Анализ конкурентных технических решений | 61 |
| 4.3 SWOT-анализ..... | 63 |
| 4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации | 64 |
| 4.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования..... | 67 |
| 4.6 Инициация проекта | 68 |
| 4.7 Планирование управления научно-исследовательского проекта | 70 |
| 4.8 Бюджет научного исследования | 73 |
| 4.9 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования | 76 |
| 5 Социальная ответственность..... | 80 |
| 5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности | 80 |
| 5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства | 80 |
| 5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя..... | 82 |
| 5.2 Производственная безопасность..... | 83 |
| 5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования | 83 |
| 5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований | 83 |
| ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. | 84 |
| 5.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата | 85 |
| 5.2.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны | 86 |
| 5.2.2.3 Повышенный уровень шума | 86 |
| 5.2.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения | 87 |
| 5.2.2.5 Поражение электрическим током..... | 87 |
| 5.2.2.6 Пожаробезопасность на рабочем месте | 88 |
| 5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов..... | 89 |
| 5.2.3.1 Требования к помещениям для работы с ПЭВМ | 89 |
| 5.2.3.2 Микроклимат | 89 |
| 5.2.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны | 89 |
| 5.2.3.4 Повышенный уровень шума | 90 |
| 5.2.3.5 Электромагнитные излучения (ЭМИ)..... | 90 |
| 5.2.3.6 Поражение электрическим током..... | 90 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.3.7 Пожаробезопасность на рабочем месте | 91 |
| 5.3 Экологическая безопасность..... | 92 |
| 5.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду | 92 |
| 5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду..... | 92 |
| 5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды | 92 |
| 5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях..... | 93 |
| 5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований | 93 |
| 5.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований | 94 |
| 5.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС | 94 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 96 |
| Приложение А | 98 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б..... | 109 |

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 110 страниц, 31 рисунок, 28 таблиц, 31 источник, 2 приложения.

Ключевые слова: топливо с инертной матрицей, высокочастотный факельный разряд, плазма, высокочастотный факельный плазмотрон, водно-органический нитратный раствор, плазмохимический синтез, оксидные композиции.

Объектом исследования является процесс плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного МОХ-топлива.

Цель работы – исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций «диоксид плутония–диоксид урана–диоксид магния» в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов.

В диссертации исследуются материалы для матрицы дисперсионного ядерного топлива. Рассматриваются методы получения дисперсионного топлива. Анализируются свойства диоксида плутония и диоксида урана под воздействием облучения.

Диссертация состоит из 5 глав. В первой главе дан обзор различных материалов матриц для топлива с инертной матрицей, способы получения дисперсионного топлива, а так же проанализированы свойства урана и плутония при воздействии облучения. Во второй главе произведен расчет и оптимизация процесса прямого синтеза в воздушной плазме топливных оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{--PuO}_2\text{--MgO}$ » для дисперсионного уран-плутониевого ядерного топлива из водно-органических нитратных растворов, включающих водные нитратные растворы делящихся металлов (уран, плутоний) и металл матрицы (магний), а также органический компонент (ацетон, этанол). В 3 главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса прямого синтеза в воздушной плазме оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов неодима, самария и магния, имитирующие процесс плазмохимического синтеза оксидных

композиций «UO₂–PuO₂–MgO».

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДЯТ – дисперсионное ядерное топливо

ТИМ – топливо с инертной матрицей

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

T_{всп} – температура вспышки

T_{восп} – температура воспламенения

T_{самовосп} – температура самовоспламенения

Q_н^c – низшая теплотворная способность жидких органических веществ

Q_н^p – низшая теплотворная способность водно-солеорганических композиций

T_{ад} – адиабатическая температура горения

ВВЕДЕНИЕ

Основная часть тепловыделяющего элемента (тепловыделяющего элемента) - ядерное топливо. Ядерное топливо в виде делящегося изотопного соединения может быть гомогенным или гетерогенным, в котором частицы изотопа деления равномерно распределены в матрице неделящихся материалов.

Характерной чертой дисперсного ядерного топлива (ДЯТ) при работе в реакторе является его более высокая радиационная стойкость по сравнению с другими видами топлива. В связи с этим отработанное ядерное топливо широко используется в исследовательских и материаловедческих реакторах и специализированных ядерных установках, которые характеризуются плотностью деления, скоростью выделения энергии и повышенной температурой. Накопленные запасы оружейного и энергетического плутония, которые необходимо перерабатывать, дополнительно стимулируют разработку и использование ДЯТ.

С этой целью разрабатывается ТИМ (топливо с инертной матрицей), представляющее из себя композицию из дисперсного материала с равномерно распределенным плутонием в матричном материале без содержания изотопы урана. ТИМ может существенно сократить количество плутония и увеличить выгорание делящихся изотопов. Применение такого топлива позволит начать переработку накопленных запасов отработавшего ядерного топлива.

В данной диссертации рассматривается статус ДЯТ в ядерной энергетике. Проанализирована подготовка нанопорошков для дальнейшего использования в производстве ДЯТ.

1 Обзор литературы

1.1 Дисперсионное ядерное топливо

Ядерное топливо, загружаемое в твэл, можно разделить на два типа. Первый представляет из себя керамику из делящегося материала, в основном диоксид урана. Второй тип – топливо с инертной матрицей (ТИМ), в котором в инертную матрицу равномерно распределяются частицы делящегося материала.

В специализированных и исследовательских ядерных реакторах актуально применение дисперсионного ядерного топлива (ДЯТ), поскольку при длительной работе реактора оно обеспечивает высокую радиационную стойкость и хорошую теплопроводность. Его отличительными характеристиками являются повышенная плотность деления, высокая скорость выделения мощности и температура.

Недавно к разработке и применению ДЯТ была добавлена еще одна мера стимулирования. Чтобы уменьшить накопление оружейного и энергетического плутония, разрабатывается ТИМ, в котором плутоний равномерно распределен в матрице без урана. ТИМ может значительно увеличить сгорание делящегося изотопа плутоний-239, а также значительно упрощает захоронение отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), при этом обладает пониженным содержанием радиоактивных отходов.

1.1.1 Материалы матрицы дисперсионного ядерного топлива

Матрица является одним из компонентов ДЯТ, обеспечивающая его высокую радиационную стойкость.

Хотя ДЯТ использовалось в реакторах для многих целей (исследовательские, энергетические, атомные электростанции и т. д.).

Выбор материала матрицы для ТИМ, необходимо начинать с определения условий эксплуатации, которые могут существенно отличаться друг от друга. Несмотря на это любая инертная матрица должна обладать

низким сечением поглощения нейтронов. Помимо этого, необходимо выполнение следующих требований:

- Достаточно высокой температурой плавления по сравнению с рабочей температурой топливного сердечника твэла;
- Обладать хорошими механическими свойствами (прочность, эластичность, твердость и т. д.), не только для ограничения давления газообразных продуктов деления, также очень важны их кратковременное значение, длительная прочность, скорость ползучести.
- Теплофизические свойства (теплопроводность, коэффициент теплового расширения и т.д.) обуславливающие невысокие перепады температуры внутри топливной таблетки и эффективную передачу энергии теплоносителю;
- Материал матрицы должен обладать совместимостью с частицами делящегося материала, а так же с теплоносителем и материалом оболочки;
- Отсутствие в материале матрицы фазовых превращений и стабильность при радиационном воздействии.

Помимо обеспечения работоспособности тепловыделяющих элементов, использующих ДЯТ, необходимо также учитывать доступность и стоимость основного материала.

Алюминий, цирконий и их сплавы широко используются в качестве материала матрицы ДЯТ при производстве тепловыделяющих элементов исследовательских реакторов и реакторов судовых атомных электростанций.

В энергетическом реакторе при производстве твэлов в качестве материала матрицы ДЯТ используется нержавеющая сталь.

При разработке ТИМ для «горения» плутония в качестве материала матрицы ДЯТ чаще всего используются керамические материалы преимущественно оксидного типа.

1.1.2 Матричные материалы в виде оксидов металлов

Уже к концу 90-х годов прошлого века основное внимание при выборе материала инертной матрицы ТИМ было сосредоточено на оксидных системах. Это в основном обусловлено тем, что наиболее изученное и используемое ядерное топливо – оксидное (диоксид урана, диоксид плутония).

В качестве матричного материала рассматривали оксид алюминия (Al_2O_3), оксид магния (MgO), оксид иттрия (Y_2O_3), диоксид циркония (ZrO_2), диоксид церия (CeO_2) и сложные оксиды металлов: шпинель (MgAl_2O_4), циркон (ZrSiO_4) и др.

В табл. 1.1 приведены физико-механические свойства оксидных матричных материалов.

Исходя из данных табл. 1.1 оксид алюминия, оксид магния, оксид иттрия, диоксид церия, стабилизированный диоксид циркония и шпинель могут быть использованы в качестве матрицы ТИМ.

Таблица 1.1 - Физико-механические свойства оксидных матричных материалов

| Свойства | Оксиды металлов | | | | | | |
|---------------------------------|--|--|--|---|---|---------------------------|------------------|
| | Al_2O_3 | MgO | CeO_2 | Y_2O_3 | ZrO_2 | MgAl_2O_4 | ZrSiO_4 |
| $T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$ | 2054 | 2827 | 2400 | 2430 | 2710 | 2105 | 1676 |
| Давление пара, мм рт. ст. | $\sim 10^{-9}$ (1950 $^\circ\text{C}$) | $\sim 10^{-4}$ (1727 $^\circ\text{C}$) | $2 \cdot 10^{-7}$ (1500 $^\circ\text{C}$) $6 \cdot 10^{-5}$ (2000 $^\circ\text{C}$) | $2 \cdot 10^{-7}$ (2000 $^\circ\text{C}$) | $2 \cdot 10^{-8}$ (2000 $^\circ\text{C}$) | | |

| | | | | | | | |
|--|--|---|--|---|--|--|---|
| $\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ | 13,3 (500 °C) 8,2 (1000 °C) 5,8 (1500 °C) | 20,0 (500 °C) 13,0 (1000 °C) 6,0 (1500 °C) 5,0 (2000 °C) | 1,2 (1000 °C) 0,9 (1500 °C) 1,2 (2000 °C) | 4,1 (500 °C) 2,5 (1000 °C) 2,9 (1500 °C) ~4,0 (2000 °C) | 2,2 (1000 °C) 1,5 (1500 °C) 1,8 (2000 °C) | 9,0 (500 °C) 7,7 (1100 °C) ~8,0 (1500 °C) | 5,4 (500 °C) 4,5 (1000 °C) 4,2 (1500 °C) |
| Модуль нормальной упругости E , ГПа | 374,63– 147,10 (293–1773 К) | 295,20– 219,68 (298–1573 К) | 162,4 (293 К) | 180,1 (293 К) | 168,68– 94,15 (293–1635 К) | 274,0 (293 К) | 154,0 (293 К) |
| Модуль сдвига G , ГПа | 124,55– 105,92 (298–1323 К) | 113,76– 35,31 (573–1673 К) | 62,74– 34,32 (303–1373 К) | – | 60,80– 97,09 (293–1573 К) | – | 64,4 |
| Коэффициент Пуассона | 0,26–0,45 (298–1473 К) | 0,36–0,47 (298– 1373К) | 0,515 (293 К) | – | 0,36 (293 К) | – | 0,19 |

Результаты совместимости и характера взаимодействия оксидных матриц с различными контактными веществами представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 - Совместимость оксидных материалов

| Контактное вещество | Характер взаимодействия | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|---|--------------------------|---------------------------|
| | Al_2O_3 | MgO | CeO_2 | Y_2O_3 | ZrO_2 | MgAl_2O_4 |
| Железо (оболочка ТВЭЛа) | Совм. при < 900 °C | Совм. при < 1100 °C | Совм. при < 650 °C | Совм. с тугопл. метал. при < 1500 °C | Совм. при < 200 °C | Совм. |

| | | | | | | |
|------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|---|
| Вода | Не раствор. | Образ. гидроксид | Не раствор. | Медл. раствор. | – | – |
| HNO ₃ | Не раствор. | Раствор. с низк. скор. | Раствор. с низк. скор. | Раствор. с низк. скор. | Не раствор. | – |

В работе отмечается, что циркон распадается на диоксид циркония и диоксид кремния при 1676 °С из-за образования эвтектики. Повышенная радиационная и химическая стойкость диоксида циркония, наряду с малым сечением поглощения тепловых нейтронов обуславливает актуальность его использования в качестве матрицы для ТИМ. Необходимо упомянуть различные типы кристаллических решеток диоксида циркония при температуре ниже температуры плавления:

- высокотемпературная кубическая фаза, изоморфная с флюоритом (CaF₂) при температуре выше 2640 °С;

промежуточная тетрагональная фаза в диапазоне температур $1440 < T < 2640$ К,

- низкотемпературная моноклинная фаза при температуре ниже 1420 К.

Очень важное свойство диоксида циркония – стабилизация кубической флюоритной структуры от температуры плавления до комнатной при замене Zr⁺⁴ в диоксиде циркония алювалентными катионами Mg⁺², Ca⁺², Y⁺³.

С помощью золь-гель метода в Итальянском институте атомной энергии (ENEA), получили образцы диоксида циркония для изучения его свойств в качестве матрицы для ТИМ, полученные данные приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3 - Теплофизические свойства инертной матрицы на основе стабилизированного диоксида циркония

| Материал | $\rho_{теор}$ | $C_{уд}$ | $\alpha \cdot 10^{-7}$ | C | $\alpha \cdot 10^{-6}$ |
|----------|---------------|----------|------------------------|-----|------------------------|
|----------|---------------|----------|------------------------|-----|------------------------|

| | г/см ³ | Дж/(кг·К) | м ² /с | Вт/м·К | °К ⁻¹ |
|---|-------------------|-----------|-------------------|--------|------------------|
| ZrO ₂ –CaO | 5,70 | 510 | 5,4 | 1,4 | 9,5 |
| ZrO ₂ –Y ₂ O ₃ | 5,95 | 500 | 6,2 | 1,8 | 8,7 |

Для использования диоксида плутония в ТИМ необходимо подобрать совместимую матрицу из оксида металла.

Совместимыми с оксидом плутония являются матрицы на основе шпинели и алюмоиттриевого граната поскольку образцы данных элементов подвергались облучению в реакторе HER с потоком нейтронов $0,46 \cdot 10^{22}$ и $1,7 \cdot 10^{22}$ см⁻² и температуре 800 К, при этом не обнаружилось каких-либо изменения по сравнению с исходными образцами. Анализ структуры данным материалов не выявил различий, однако в ряде зерен обнаружены дислокационные петли[1].

В табл. 1.4 показано влияние облучения на длину оксидных матриц, используемых в ТИМ, под действием быстрых нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) $1,96 \cdot 10^{26}$ м⁻² и максимальной линейной мощности 4,4 кВт. Облучение происходило при температуре 1100 К.

Таблица 1.4 - Изменение длины оксидных образцов матричных материалов в результате радиационного воздействия

| Материал образца | Длина образца до облучения L_0 , мм | Длина образца после облучения L , мм | Относительное изменение длины $(L-L_0)/L_0$, % |
|--|---------------------------------------|--|---|
| MgO | 252,6 | 253,7 | 0,4 |
| Al ₂ O ₃ | 249,0 | 252,3 | 1,3 |
| MgAl ₂ O ₄ | 252,5 | 252,9 | 0,2 |
| Y ₃ Al ₅ O ₁₂ | 251,0 | 248,6 | -0,2 |

Данные в табл. 1.4 позволяют сделать вывод о том, что оксидные

матрицы не подвергаются существенным изменениям, кроме оксида алюминия, у которого длина увеличилась на 1.3 %.

Влияние потока ионов на набухание шпинели изучали в Институте трансуранных элементов (Италия), где ионами йода с энергией 73 МэВ бомбардировали оксид церия и шпинель. Полученные результаты представлены на рис. 1.1.

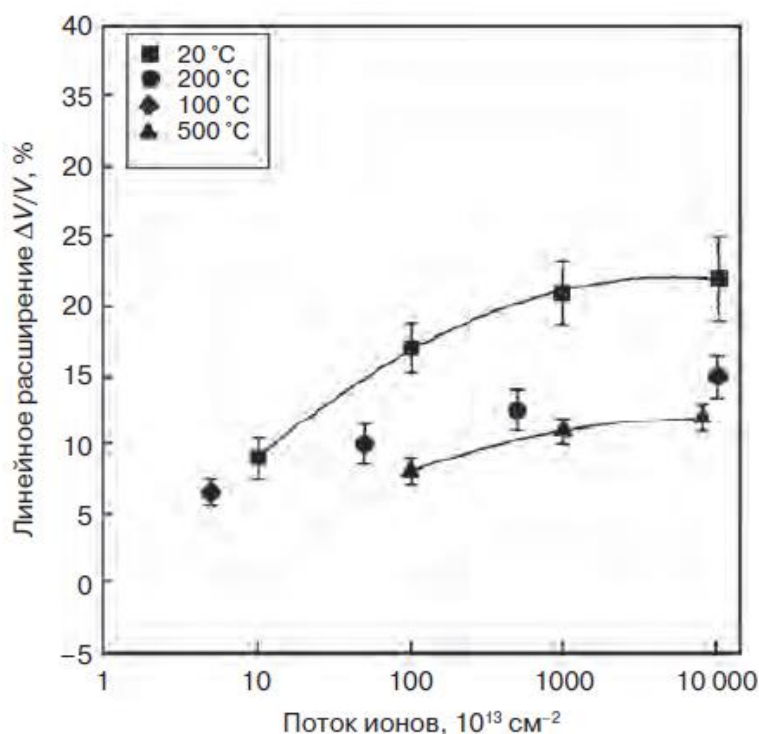


Рис. 1.1. Влияние плотности потока ионов на набухание монокристаллов шпинели

Опыт EFTTRA-T3, проводился с целью изучения поведения оксидных матриц, используемых в ТИМ под действием потока тепловых нейтронов при температуре 650–700 К, в высокопоточном реакторе.

В табл. 1.5 и 1.6 приведены данные, показывающие влияние облучения на твердость по Виккерсу и вязкость разрушения.

По данным из табл. 1.5 видно, что для оксидов иттрия и диоксида церия характерно увеличение твёрдости, прочности и вязкости разрушения, что объясняется реакторным спеканием образцов.

Таблица 1.5 - Влияние облучения на изменение твердости по Виккерсу вероятных материалов матрицы IMF-топлива

| Матрица | Твердость по Виккерсу | | Изменение геометрической плотности после облучения, % |
|--|-------------------------|--------------------------|---|
| | До облучения | После облучения | |
| CeO ₂ | 533 ± 156 ^{xx} | 884 ± 172 ^{xx} | −4,9 ± 1,5 |
| MgO | 1069 ± 103 | 1069 ± 103 ^{xx} | 0,9 ± 1,0 |
| Y ₂ O ₃ | 843 ± 27 | 1067 ± 95 ^{xx} | −1,4 ± 0,4 |
| MgAl ₂ O ₄ | 1616 ± 114 ^x | 1664 ± 176 ^x | – |
| Y ₃ Al ₅ O ₁₂ | 1447 ± 68 ^x | 1015 ± 61 ^x | 10,5 ± 1,1 |

Примечание: ^{xx} – нагрузка 100 г; ^x – нагрузка 200 г.

Данные табл. 1.6 показывают, что вязкость разрушения шпинели и алюмоиттриевого граната уменьшается в результате облучения, прочность шпинели остается постоянной, а алюмоиттриевого граната – уменьшается.

Таблица 1.6 - Влияние облучения на вязкость разрушения вероятных материалов матрицы ТИМ

| Матрица | Вязкость разрушения | | |
|----------------------------------|-------------------------|--|---------------------------------|
| | Полученные данные | | Данные по необлученным образцам |
| CeO _{2-x} | 1,3 ± 0,2 ^{xx} | 1,6 ± 0,5 ^{xx} 1,9 ± 0,4 ^{xx} | 1,6–1,8 |
| MgO | | 2,1 ± 0,6 ^x | – |
| Y ₂ O ₃ | 1,8 ± 0,3 ^x | 2,2 ± 0,5 ^{xx} 2,2 ± 0,4 ^x | – |
| MgAl ₂ O ₄ | 2,6 ± 0,5 ^x | 2,1 ± 0,3 ^x | 3,0 |

| | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | $1,95 \pm 0,10$ |
| $Y_3Al_5O_{12}$ | $2,6 \pm 0,5^x$ | $1,8 \pm 0,4^x$ | $1,9 \pm 0,2$ |

Примечание: ^{xx} – нагрузка 100 г; ^x – нагрузка 200 г.

Из анализа представленных свойств оксидных матриц для ТИМ, следует выделить ряд наиболее перспективных материалов матриц, а именно диоксид циркония, оксид магния, шпинели и алюмоиттриевого граната. Наименее перспективными матричными материалами является оксид алюминия, которому свойственно увеличиваться в размере при облучении, а также циркон, который помимо неудовлетворительной устойчивости под облучением, склонен к распаду после обжига[2].

1.2 Методы получения дисперсионного топлива

В научно-технической литературе существует около десятка методов получения дисперсных материалов, основанных на различных физических и химических принципах. ДЯТ можно получать либо с помощью механического воздействия на систему и дальнейшем распределении частиц в дисперсной фазе, либо используя методы конденсации, в результате которых полученные порошки диспергированы на молекулярном уровне. Тонны сырья производятся в свободнодисперсном виде, что значительно упрощает процесс транспортировки и дозирования, при этом становится возможным получение однородных материалов при их перемешивании.

1.2.1 Диспергационные методы

Метод диспергирования является процессом внешнего механического воздействия на систему, которое позволяет преодолевать межмолекулярные взаимодействия и поверхностную энергию. Благодаря простому технологическому процессу и широкому спектру веществ, получаемых с помощью механического диспергирования, данный метод реализуется при

промышленном производстве следующими способами: истирание, дробление, расщепление, разбрызгивание, барботаж (чтобы воздух проходил через жидкость). В данном случае используются различные типы мельниц: шаровые мельницы, планетарные мельницы, струйные мельницы, вихревые мельницы, вибрационные мельницы, пульверизаторы и истираторы. Этот метод отличается высокой производительностью, но при измельчении практически невозможно получить частицы размером менее нескольких микрон. Для получения частиц с размерами менее 10 нм, необходимо использовать более дорогостоящие методы, поскольку из-за уменьшения размера частиц происходит возрастание механической прочности. Например, с помощью взрывных волн с давлением 10 ГПа и длительностью импульса 10 мкс, можно получать порошки с размером менее 10 нм. Однако продукты истирания измельчителя загрязняют получаемый материал, полученные частицы имеют большие изменения размера и различную форму, а сложность управления свойствами материала в процессе производства ограничивает его использование.

1.2.2 Метод разложения термически нестойких солей

При разложении термически нестойких солей образуются газообразные продукты, приводящие к диспергированию твердой фазы, при этом получают нанопорошки с размером частиц 10-400 нм. Наименьшая дисперсность системы достигается при разложении гидроксидов, поскольку чем выше температура процесса, тем крупнее получаются частицы.

Данный метод позволяет получать нанопорошки с размерами частиц порядка 10 нм, при этом не требуется сложного технического оборудования. Например, при разложении гидроксида никеля при температуре 230 °С, можно достичь размеров 5 нм, однако при разложении нитрата никеля и увеличении температуры в печи размер частиц возрастает, при 400 °С размер частиц составляет 40 нм.

Необходимо учитывать, что в печи происходит одновременно два

конкурентных процесса, разложение и спекание, что приводит к усложнению технологического процесса, проблемой контроля и регулировки конечного размера частиц. Кроме того, порошок, полученный этим методом, отличается высокой химической активностью. Поскольку необходимо учитывать растворимость исходных продуктов, и последующую их очистку, выгодно использовать алкоholes в качестве исходных продуктов, так как они обладают хорошей летучестью и растворимостью, при этом возможна глубокая очистка их от соединений других металлов[3].

1.2.2 Конденсационный метод

Переход системы от однородной к гетерогенной в конденсационном методе происходит при достижении пересыщенного состояния вещества. Перенасыщение означает, что при заданных условиях (температура, свойства растворителя) степень концентрации превышает стандартное значение для данного вещества. При проведении химической реакции или изменение физических условий в которых находится исходное сырье, происходит перенасыщение системы, после чего образуются частицы с равномерным распределением фаз. Для метода конденсации не требуется специального оборудования, и по сравнению с методом диспергирования позволяет получать меньший размер частиц.

1.2.2 Химическая конденсация

Химическая конденсация является базовым методом конденсации. Получение нерастворимых частиц в дисперсной фазе осуществляется за счет проведения химической реакции из раствора реагента. Методика проведения химической конденсации может включать в себя такие реакции как: нейтрализация, окислительно-восстановительные и т.д. Параметры подбираются таким образом, чтобы давление равновесных паров было ниже давления пара вещества. В результате образуется дисперсная система, из-за

пересыщения системы выделяется новая фаза в виде гомогенной системы.

1.2.3 Химические растворные методы

Химический растворный метод заключается в осаждении гидроксида осаждающим агентом в виде раствора щелочи или аммиака, в качестве исходного реагента применяется ацетат или нитрат. При осаждении соли с последующим гидролизом, получают высоко дисперсные пористые структуры геля.

К недостаткам этого метода следует отнести меньшую дисперсность частиц и наличие примесей. Простота использования и относительно недорогое оборудование является существенным преимуществом данного метода. Поскольку на завершающей стадии происходит отжиг гидроксида, из-за чего он спекается, возникает ограничения минимально возможного размера порошка в 100 нм[4].

1.2.4 Золь-гель – метод

Для производства микропористой керамики разработан золь-гель метод, в котором исходное сырье проходит поэтапно процессы гидролиза с конденсацией, с последующим высушиванием путем нагрева, при этом прекурсор преобразуется в золь, а затем в гель.

На практике образование золя возможно при электродиализе прекурсора, а также пептизацией осадков в воде или кислоте. Конечный продукт в виде сыпучего порошка получают путем удаления воды из золя, с последующим прокаливанием и переводом в гель.

В роли исходного материала возможно использование как неорганических соединений, так и металлоорганических алколюатов. Данный метод позволяет получать сложные оксидные композиции с высокой дисперсностью заданного состава. При этом возможно влиять на качество и размер частиц, если изучить оптимальные параметры реакции, такие как время и температура реакции.

1.2.5 Метод гидротермального синтеза

Метод гидротермального синтеза реализуется за счет увеличения растворимости неорганических веществ в воде при высокой температуре и давлении. Кристаллизация материала из жидкой фазы возможно после проведения химической реакции окисления и гидротермального разложения, протекающие при высоких значениях температуры (100–370 °С) и давления (до 100 МПа), так же возможен сверхкритический режим при более высокой температуре.

Изменения таких свойств реагентов как растворимость, скорость диффузии, а также изменение структуры воды, происходит из-за повышенного давления паров, возникающего из-за высокой температуры.

Для образования высококачественных наночастиц, необходимо контролировать размеры и скорость синтеза наночастиц, этого добиваются благодаря контролю температуры и давления паров.

Практическая реализация метода заключается в выборе растворителя таких как бензол, спирты и вода, и последующем нагреве заданной смеси в автоклаве.

Несмотря на то, что при гидротермальном синтезе процесс контроля формы и размера наночастиц не до конца изучен, следует отметить, что плюсом данного метода является узкий диапазон размеров наночастиц. Однако к минусам следует отнести высокую себестоимость и сложность эксплуатации оборудования, при этом невозможно реализовать непрерывный процесс синтеза дисперсионных нанопорошков, то есть процесс является периодичным[5].

1.2.6 Пиролиз полимерно-солевых композиций

Образование мелкодисперсных порошков в методе пиролиза полимерно-солевых композиций происходит за счет термического разложения заранее заготовленной полимерно-солевой композиции, и в результате выделяющегося в больших объемах газа, на выходе

синтезируются сложные оксидные наноразмерные частицы.

Для реализации пиролиза необходимо подготовить полимерно-солевую композицию из солей не обладающих термической устойчивостью (ацетаты, ормиаты и др.) и полимерной части включающую в себя метилцеллюлозу и спирт.

Для данного метода отсутствует необходимость в отжиге полученных порошков, либо при необходимости отжига достаточна небольшая температура и длительность. К плюсам пиролиза полимерно-солевых композиций следует отнести возможность синтеза достаточно малые порошки с равномерным распределением фаз, при этом распределение частиц по размерам находится в диапазоне от 60 до 100 нм.

К достоинствам обозреваемых способов осаждения с использованием жидкой фазы относятся:

- экономичность;
- получение при необходимости двойных и тройных композиций;
- возможности влиять на морфологию частиц;
- простота оборудования и отсутствие сложностей при проведении технологического процесса.

Помимо перечисленных преимуществ метод осаждения имеет ряд недостатков, а именно, относительно небольшую производительность, необходимость проведения технологического процесса в несколько стадий, а так же при осаждении часть продукта теряется в виде геля.

1.2.7 Плазмохимические способы

Суть любого плазмохимического метода заключается в создании неравновесной низкотемпературной плазмы в которой происходит образование зародышей новой фазы с небольшой скоростью роста и равномерным распределением фаз. Плазмохимический синтез не требует дорогостоящего оборудования и позволяет получать хорошую дисперсность и чистоту синтезируемых нанопорошков, в отличие от механических и

электроннолучевых методов.

На практике плазмохимический синтез протекает с использованием плазмообразующего газа в виде азота, углерода, кислорода и т.д. в низкотемпературной плазме (4000–8000 К) дугового или сверхвысокочастотного разряда, в который организуют подачу сырья. Влияние на размер образующихся частиц и уменьшение вероятности слияния при столкновении оказывает скорость охлаждения потока выходящего из реактора плазмотрона.

Химическая реакция происходит за счет получения энергии от плазмы после прохождения сырья зоны поддержания плазмы, при этом происходит образование наноразмерных частиц, которые необходимо отделить от газовой фазы. На характеристики получаемых порошков влияет, исходный раствор, технологический процесс и тип плазмотрона.

В зависимости от агрегатного состояния сырья (твердые частицы, жидкий раствор, газообразные соединения) плазмохимические методы можно разделить на 3 группы, несмотря на это, все плазмохимические подразумевают конденсацию частиц, прореагировавших в плазме из газовой фазы[6].

1.2.8 Переработка газообразных соединений в плазме

В методе переработки газообразных соединений в плазме, разогрев до высоких температур происходит при смешивании сырья с плазмой, после чего происходит образование наночастиц продукта в газовой фазе. Вследствие флуктуаций плотности возникают зародыши в газовой фазе и при осаждении частиц на стенках, которые необходимо отделить от газовой фазы.

Плазмохимическому процессу характерны два способа укрупнения частиц. Один из них происходит вследствие слипания частиц, что приводит к образованию агломератов. Второй способ, представляет из себя рост крупных частиц вследствие переноса вещества, при этом мелкие частицы испаряются.

Исключение образования агломератов достигается за счет замедления их роста и укрупнения, для этого необходимо резко увеличить пересыщение путем резкого охлаждения смеси. На практике вводят холодные газы, что приводит к закалке и разбавлению продуктов реакции.

Основные достоинства метода таковы:

- 1) Высокая производительность реактора, обусловленная большой скоростью химических реакций вследствие высокой температуры;
- 2) Получение нанопорошков высокой чистоты, с низким содержанием примесей;
- 3) Возможность легирования продукта микропримесями других веществ.

К недостаткам метода можно отнести:

- 1) высокую коррозионную активность летучих соединений;
- 2) Способность наночастиц адсорбироваться;

1.2.9 Переработка капельно-жидкого сырья

В отличие от предыдущего метода, сырье впрыскивается в плазму с помощью форсунок, соответственно в методе переработки капельно-жидкого сырья происходит процесс нагревания и испарения капель. В результате распыления получаются капли с высокой дисперсностью имеющие диаметр от 1 до 50 мкм.

В данном методе образование частиц происходит двумя путями. Первый из них представляет собой образование более крупных частиц которое происходит за счет появления центра кристаллизации в каплях исходного раствора. Вторым путем заключается в том, что после испарении капель исходного раствора, протекают химические реакции в газовой фазе, после которых необходимо выделить нанопорошки путем охлаждения.

Использование в качестве исходной смеси соединения металлов с учетом их стехиометрических соотношений позволят получать сложные оксидные нанопорошки. Основное сырье является либо полностью жидким,

либо водным раствором.

Образование оксидов происходит в процессе сушки капли и удаления растворителя, вследствие чего частица соли разлагается с образованием оксида. Конечный размер и форма нанопорошков зависит изначальной концентрации и характером взаимодействия с плазмообразующим газом.

По сравнению с методом переработки газообразных соединений, в данном методе возможно получение сложных оксидных композиций с равномерным распределением фаз, при этом среда менее агрессивная и токсичная, а так же доступность сырья приводит к удешевлению технологии.

1.2.10 Переработки твердых частиц, взвешенных в потоке плазмы

Главное отличие метода переработки твердых частиц, от предыдущих двух заключается в способе подачи сырья (в виде порошка) и появлении процесса плавления при прохождении исходного порошка потока плазмы.

В данном методе формирование частиц происходит таким же образом, как и в двух предыдущих, но так же возможно взаимодействие твердого порошка исходного сырья с его жидкой фазой, что приводит к увеличению распределения частиц по размерам, появляются частицы с размером от 100 до 500 нм.

Появление данного метода обусловлено невозможностью подачи в плазмотрон некоторых веществ в жидкой и газообразной фазе. Помимо широкого диапазона возможных веществ подаваемых в плазму, сохраняются такие достоинства как доступность сырья и отсутствие агрессивной и токсичной среды. Минусом данного метода следует отметить наличие в качестве примесей исходных металлов и восстановителей, а так же неполную переработку сырья [7].

Таким образом, плазмохимический метод для получения нанодисперсных порошков с равномерным распределением фаз, позволяет получать порошки различных химических составов, при этом обладает приемлемой энергоемкостью.

Основным минусом плазмохимического метода, является высокая дисперсия частиц в пределах от 5 до 5000 нм, что указывает на плохую селективность и повышенное содержание примесей в порошке.

1.3 Оксид плутония и смешанное уран-плутониевое оксидное топливо

Плутоний образует несколько оксидов от PuO до PuO_2 . Диаграмма состояния системы $\text{Pu}-\text{O}$ отличается значительной сложностью, в связи с тем, что плутоний, как и уран, образует нестехиометрические оксиды, но если для UO_2 характерно сверхстехиометрическое состояние с внедренным в междоузлия кислородом, то PuO_2 легче переходит в достехиометрическое состояние.

Кроме PuO_2 в системе $\text{Pu}-\text{O}$ обнаружен оксид PuO , оксид Pu_2O_3 с кубической решеткой и оксид Pu_2O_3 с гексагональной решеткой. Как показали результаты более поздних исследований, PuO_2 не образует непрерывный твердый раствор при температурах выше 1000°C .

PuO_2 имеет структуру флюорита, изоморфную с UO_2 . Элементарная ячейка содержит 4 атома плутония и 8 атомов кислорода. Период кристаллической решетки равен $5,396 \pm 0,001$ А. Ее рентгенографическая плотность $11,46 \text{ г/см}^3$. PuO_2 легко теряет кислород при повышенной температуре в инертной и восстановительной средах, что сопровождается расширением элементарной ячейки в результате образования иона Pu^{+3} .

Этот эффект заметно проявляется при температурах выше $1100-1200^\circ\text{C}$. После охлаждения до комнатной температуры образуется двухфазный продукт Pu_2O_3 и $\text{PuO}_{1,98}$. Это превращение происходит настолько быстро, что однофазный состав не всегда можно зафиксировать закалкой. Период решетки $\text{PuO}_{1,98}$ равен $5,398 - 5,400$ А. Нагрев смеси Pu_2O_3 и $\text{PuO}_{1,98}$ на воздухе до 800°C приводит к ее окислению до состава PuO_2 .

Изотермическое сечение диаграммы $\text{U}-\text{Pu}-\text{O}$ при комнатной температуре показано на рисунке 1.2.

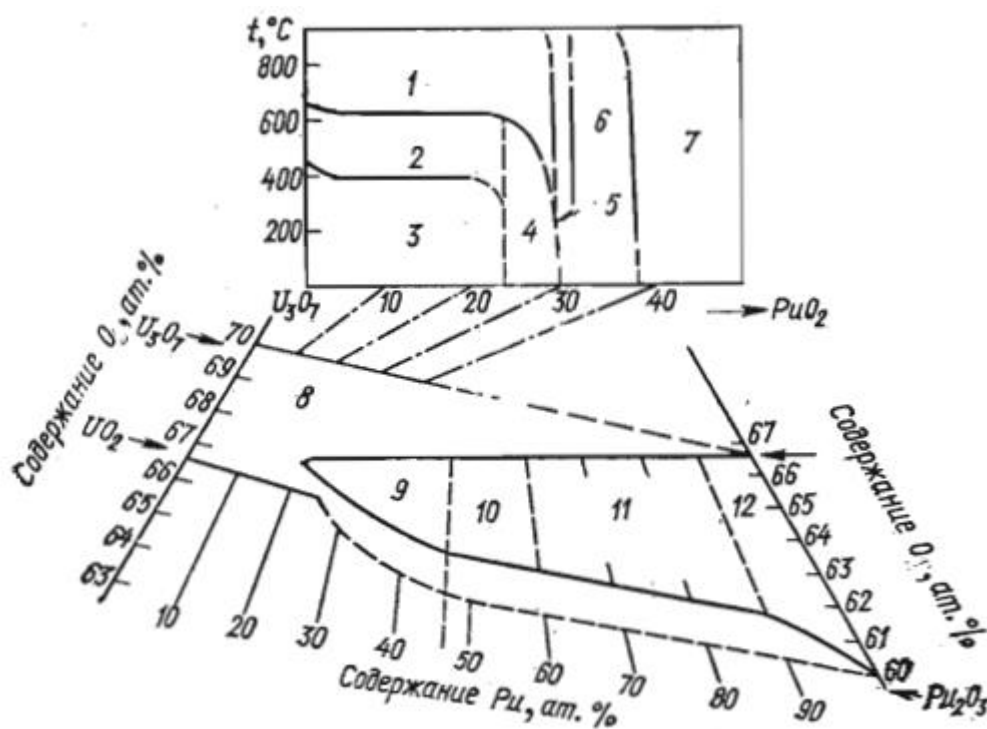


Рисунок 1.2. Изотермическое сечение системы U–Pu–O при низкой (комнатной) температуре

Эти результаты получены на медленно охлажденных до комнатной температуры образцах, затем отожженных при 200°C и опять медленно охлажденных.

Достехиометрические смешанные оксиды урана и плутония получаются при частичном восстановлении водородом, содержащим некоторое количество воды. Полное восстановление происходит в среде чистого водорода. Для отношения $Pu/(Pu+U) > 0,2$ обнаружена область с двумя гранецентрированными кубическими фазами, одна из которых содержит Pu(IV), вторая — вероятно, полностью восстановленный Pu(III). Область, простирающаяся от гранецентрированной до объемноцентрированной фазы, находится в пределах от 45 до 50% PuO_2 [8].

Имеется большая однофазная область с структурой объемноцентрированного куба в пределах отношений $Pu/(U+Pu)$ 0,5–0,97. Смешанные оксиды, восстановленные в чистом водороде при 1800°C, содержат металлическую фазу, когда охлаждение проводится в вакууме; при этих условиях U+4 может восстанавливаться в соответствии с бинарной

системой U–O. Эта металлическая фаза находится в равновесии с гранецентрированной или объемноцентрированной фазами и, вероятно, также с гексагональной фазой системы Pu–O. Исследованное бинарное сечение $\text{U}_3\text{O}_7\text{--PuO}_2$ показано в верхней части рисунка 1.3.

1.3.1 Получение смешанного оксидного топлива

При производстве порошков PuO_2 и UO_2 , необходимо учитывать, что их химическая активность уменьшается после прокаливания, вместе с этим растет размер частиц и насыпная плотность, при чем на изменение этих параметров сильно влияет технология производства.

Поскольку плутонию свойственно радиотоксичность и прямое излучение, необходимо разрабатывать дополнительные меры защиты, такие как дистанционное управление. Поскольку технология производства урановых твэлов хорошо отработана, необходимо использовать этот опыт, однако для плутония такая же технология будет существенно дороже урановой, из-за радиоактивности.

Таким образом введение плутония в цепочку ядерного топливного цикла приведет к удорожанию ядерного топлива в два раза, относительно получения топлива из урана. Для окупаемости такого производства необходимо нарастить мощности по производству твэлов до 30 тонн в год, при этом основные затраты связаны с усилением безопасности работы персонала.

1.3.2 Изготовление таблеток

В основном ядерное топливо представлено в виде спечённой керамики, изготовленный путем прессования и спекания. Важнейшими характеристиками таких таблеток являются: микроструктура, влажность, наличие примесей, плотность, распределение плутония по объёму таблетки.

На выбор метода изготовления таблеток, влияет в первую очередь равномерность распределения плутония по объёму таблетки и физические

свойства порошков. Получать такие таблетки можно механическим перемешиванием порошков диоксида урана и плутония, либо восстановлением осадка из растворов солей. При необходимости обеспечения текучести порошка оксиды производят осаждением из диураната аммония и гидроксида плутония, после чего необходимо провести процедуру фильтрации, отжиг и восстановление в водороде [9].

Разработана технология, позволяющая вести непрерывный технологический процесс получения оксидов плутония и урана, с размером частиц 50- 600 мкм, с незначительным загрязнением продукта материалом реактора. Таблетки, спрессованные без связки при давлении 5700 кгс/см^2 и спеченные при 1850°C , имели плотность 87% теоретической (ТП). В данной технологии нитраты урана и плутония разлагаются в кипящем слое, при этом происходит денитрирование нитратных растворов, после чего необходимо провести водородное восстановление при температуре 500°C .

При промышленном производстве механическое перемешивание порошков оксида урана и плутония, экономически более выгодно, чем приготовление керамики методом осаждения, но поскольку метод осаждения позволяет получить равномерное распределение фаз и значительно упростить переработку отработавших ТВЭЛов, то с точки зрения внешнего топливного цикла, метод осаждения более выгоден. Дополнительные затраты при механическом смешивании порошков, могут возникнуть из-за необходимости выравнивания распределения фаз, так как неравномерности в распределении фаз приводит к ухудшению нейтронно-физических и тепловых характеристик спеченных таблеток

Необходимо проводить процесс грануляции для порошков оксидов урана и плутония, поскольку для прессования частицы обладают плохой текучестью и малым размером, из-за этого невозможно достигнуть заданную плотность.

Процесс грануляции может осуществляется без использования жидкости, для этого порошок прессуют под давлением немного меньшем по

сравнению с давлением при прессовании, после чего происходит грануляция и перемешивание с ухой связкой, которая упрощает выталкивание таблеток из пресс-форм за счёт уменьшения трения. Так же для грануляции применяют мокрый процесс, при котором оксиды урана и плутония перемешивают с органическим компонентом и сушат, после чего протирают через сетку.

Мокрый процесс грануляции имеет следующие недостатки:

- 1) Размер обрабатываемой партии продукта в целях ядерной безопасности должен быть ограничен, так как добавляемый раствор связующего является материалом, замедляющим нейтроны;
- 2) Увеличивается продолжительность процесса, в связи с тем, что растворитель связующего необходимо удалять при сравнительно низких температурах, при которых не происходит значительного испарения связующего и окисления оксида урана;
- 3) Скорость увеличения температуры при спекании должна быть ограничена, особенно в начальной стадии, во избежание разрушения таблеток ввиду слишком интенсивного испарения связующего.

Однако брак при прессовании таблеток (сколы, трещины, конусность, бочкообразность и т. д.) после мокрого процесса грануляции встречается гораздо реже, чем после сухого. В связи с этим мокрую грануляцию используют в том случае, когда необходимо высокое качество таблеток. Технологический процесс прессования оксидной композиций из уран-плутониевого ядерного топлива не отличается от аналогичного процесса для оксида урана [10].

Спекание таблеток происходит при температуре 1600-1800 °С, при этом происходит удаление летучих примесей и органического компонента, а так же улучшается гомогенность состава. Для образования твердого раствора (U, Pu)O₂ из механически перемешанных порошков UO₂ и PuO₂ требуется несколько часов выдержки.

Режим спекания UO₂-PuO₂, влияет на состав твердых растворов,

поскольку плутоний и уран обладают различной активностью к водороду и кислороду, таким образом на процесс влияет газовая среда.

Разработка методов влияния на плотность таблеток при спекании, необходимо для случаев, когда требуемая плотность должна составлять 87% от теоретической плотности, в то время как обычно достигается плотность 93 – 96% от теоретической.

Один из способов предусматривает развитие макропористости в спекаемом материале за счет испарения добавляемых к нему органических материалов, например, стеарата цинка, однако при использовании этого способа трудно обеспечить стабильность конечной плотности таблеток. Лучшие результаты были достигнуты путем снижения активности порошкообразного материала предварительной термообработкой в среде углекислого газа при температурах до 820°C (Рисунок 1.3).

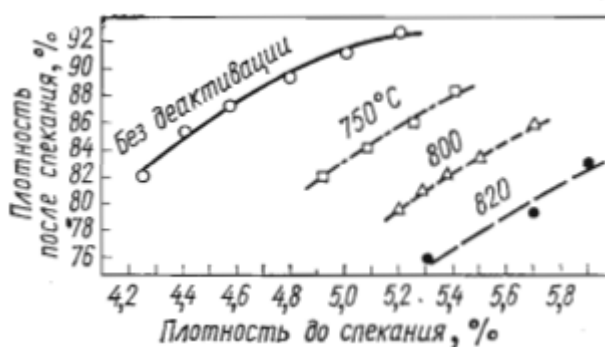


Рисунок 1.3. Влияние дезактивационной температуры на плотность таблеток, спеченных при 1600°C в течении 4 ч в атмосфере Ar+5% об.Н₂

1.3.3 Поведение PuO_2 и $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ под облучением

Существенные изменение претерпевает керамическое ядерное топливо находясь под облучением в реакторе, поскольку оксидное топливо обладает низкой теплопроводностью возникают большие перепады температур, которые доходят до 1000 градусов, при этом диаметр ТВЭЛа составляет 5 мм, такие перепады могут приводить к разрушению топливной таблетки.

В следствие большого перепада температуры внутри топливной

таблетки происходят следующие процессы: изменение концентраций диоксида урана и плутония, появление и миграция микропор, перенос материала. На скорость данных процессов влияет исходный состав топлива, его химический состав, а также режим облучения.

Разница в кинетике перестройки виброуплотненного топлива и таблеточного обусловлена изначальным количеством пор в топливе. Влияние диоксида плутония на кинетику перестройки проявляется при концентрациях более 5%, до этой концентрации каких-либо отличий от топлива из диоксида урана не наблюдается, поскольку такая низкая концентрация практически не влияет на температуру плавления и теплопроводность. При достижении температуры в 1700 °С поры начинают активно перемешаться в радиальном направлении, образуя полость в центре сердечника ТВЭЛа.

При развитии высокой тепловой мощности начинается процесс плавления топлива. Так при мощности 60 Вт/см начинает плавиться таблеточное топливо, а при 50 Вт/см виброуплотненное, при этом температура поверхности составляет порядка 500 °С.

При исследовании микроструктуры зона расплавленного топлива видна как хорошо очерченная область с мелкозернистой структурой и сферическими или трубчатыми порами, ориентированными в радиальном направлении. Образование полости в центре топливной таблетки, приводит к увеличению плотности и теплопроводности, однако максимальная температура уменьшается. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что в различных видах исходного топлива (таблетированного и виброуплотненного) происходит сближение максимальных температур сердечника ТВЭЛа и профиля распределения температур по радиусу.

Увеличение концентрации диоксида плутония приводит к более интенсивному изменению структуры топливной таблетки, при этом уменьшается температура центра. Так, например, при прочих равных условиях расчетная максимальная температура смешанного оксидного топлива при 623 Вт/см в тепловом реакторе оказалась на 180° ниже, чем

топлива из UO_2 .

1.3.4 Применение PuO_2 и $(\text{U,Pu}) \text{O}_2$ в ядерных реакторах

Развитие ядерной энергетики обусловило рост количества производимого в водородных реакторах плутония. На каждые 4 МВт мощности атомной электростанции в год выделяется 1 кг плутония. В 1972 г. впервые мировое производство плутония стало превышать потребность в нем для исследований и экспериментов, а в 1975 г. во всех странах с развитой ядерной энергетикой начинается накопление плутония для энергетических целей. Темп производства плутония в западных странах будет иметь почти экспоненциальный характер и в начале 80-х годов составит примерно 100 т/год делящегося плутония.

Большое количество плутония, которое начинает накапливаться, в ближайшем будущем позволит реализовать программу его эффективного использования в легководных реакторах и, особенно в реакторах на быстрых нейтронах. Для реализации этих программ создаются плутониевые лаборатории, рассчитанные на работу с высокоактивными образцами и облученными ТВЭЛами. Исследования подкрепляются экспериментами по облучению в реакторах с большим потоком нейтронов и в критических сборках.

Большая программа по облучению ТВЭЛов с виброуплотненным и таблетированным горючим из $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ выполнена на реакторе «Сакстон» (США). Вторая загрузка этого реактора содержала топливо состава $\text{UO}_2 - 6.6\% \text{ PuO}_2$ в девяти сборках (638 ТВЭЛов), в том числе 490 ТВЭЛов с таблеточными сердечниками (плотность $94 \pm 2\%$) и 148 ТВЭЛов с виброуплотненным топливом (плотность $87 \pm 1\%$); примерно 1/20 часть ТВЭЛов имела оболочки из нержавеющей стали 304, а остальные из сплава циркония.

Достигнутая глубина выгорания составила 29000 МВт–сутки/т для АЭС «Сан-Онофр» (США); начиная с 1970 г. было изготовлено 734 ТВЭЛа с

плутоний содержащим топливом. В кипящем реакторе EBWR (США) впервые смешанное топливо $\text{UO}_2 - 1,5\% \text{PuO}_2$ было испытано в 1966 г. в виде ТВЭЛов с виброуплотненным сердечником в оболочке из циркония. Достигнутое выгорание составило 18000 МВт–сутки/т, линейная мощность ТВЭЛов 1280 Вт/см. В состав третьей загрузки кипящего реактора «Холден» (1967 г.) вошли опытные ТВЭЛы с виброуплотненным таблетированным сердечником из $\text{UO}_2 \text{PuO}_2$.

Радиационные исследования поведения смешанного оксидного топлива показали, что по своим характеристикам это топливо не уступает UO_2 , и ныне техническая осуществимость плутониевого цикла в реакторах на тепловых нейтронах и создание работоспособного топлива в виде $\text{UO}_2\text{--PuO}_2$ могут считаться доказанными. Повторное использование плутония в действующих водоводяных реакторах без изменения конструкции активной зоны в настоящее время не представляет трудностей.

Сейчас осуществляется использование оксидного смешанного топлива в реакторах на быстрых нейтронах АЭС. Топливо состава $\text{UO}_2 + (15\text{--}20)\% \text{PuO}_2$ предполагается использовать в реакторах БН-350 и БН-600 (СССР). Вступили в строй действующих демонстрационные АЭС «Феникс» (Франция) и PFR (Англия). В первую загрузку реактора вошли как ТВЭЛы с таблетированным, так и с виброуплотненным сердечником; было изготовлено 4,5 т таблеток и 0,6 т гранулята для вибротвэлов.

Конечной целью этих работ является создание экономически выгодных реакторов на быстрых нейтронах электрической мощностью 1000–1500 МВт. Первая партия стержней с топливом в виде твердого раствора $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ для быстрого реактора LMFBR (США) была облучена до выгорания 50000 МВт–сутки/т в потоке быстрых нейтронов в реакторе EBR-I1 (США) при линейном тепловыделении 500—530 Вт/см и максимальной температуре оболочки 650°C [11].

2 Расчетная часть

2.1 Расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов и определение оптимальных составов.

В таблице 2.1 приведены значения низшей теплотворной способности Q_H^c выбранных нами горючих компонентов в составе водно-органических нитратных растворов.

Таблица 2.1. - Показатели горючести органических веществ

| Параметр | Вещество | | | | |
|----------------------|----------|--------|----------|---------|--------|
| | Метанол | Этанол | Пропанол | Бутанол | Ацетон |
| Q_H^c , МДж/кг | 19,95 | 26,80 | 31,38 | 33,47 | 31,54 |
| $T_{вспышки}$, К | 284 | 285 | 285 | 302 | 254 |
| $T_{самовоспл.}$, К | 658 | 619 | 673 | 618 | 738 |

Для образования сложных оксидных композиций различного состава определены следующие оптимальные по составу растворы ВОНР, имеющие $Q_{нр} \geq 8,4$ МДж/кг:

– ВОНР-1 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 3,8 % $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 34,3 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 6,9 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «85,5% UO_2 –9,5 % PuO_2 –5,0 % MgO »;

– ВОНР-2 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 7,6 % $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 34,48 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 6,9 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «85,5% UO_2 –9,5 % PuO_2 –5,0 % MgO »;

– ВОНР-3 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 11,4 % $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 26,7 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 6,9 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «85,5% UO_2 –9,5 % PuO_2 –5,0 % MgO »;

– ВОНР-4 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 3,24 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 29,3 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 12,45 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «81 % UO_2 –9 % PuO_2 –10 % MgO »;

– ВОНР-5 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 6,5 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 26 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 12,45 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «81 % UO_2 –9 % PuO_2 –10 % MgO »;

PuO_2 –30 % MgO »;

– ВОНР-16 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 1,01 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 9,1 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 34,9 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «45 % UO_2 – 5 % PuO_2 –50 % MgO »;

– ВОНР-17 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 2 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 8,1 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 34,8 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «45 % UO_2 – 5 % PuO_2 –50 % MgO »;

– ВОНР-18 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 3 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 7 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 34,9 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «45 % UO_2 – 5 % PuO_2 –50 % MgO »;

2.2 Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки растворов ВОНР

Термодинамические расчеты равновесных составов продуктов плазменной переработки растворов ВОНР проведены с использованием лицензионной программы термодинамического расчета состава фаз произвольных гетерогенных систем «TERRA».

На рисунках 2.2 – 2.7 представлены характерные равновесные составы продуктов плазменной переработки растворов ВОНР на основе ацетона.

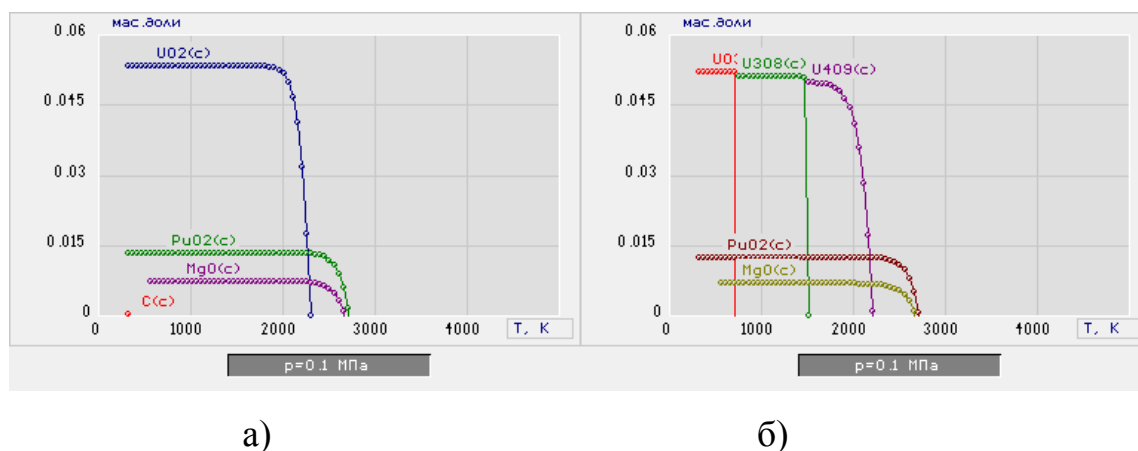
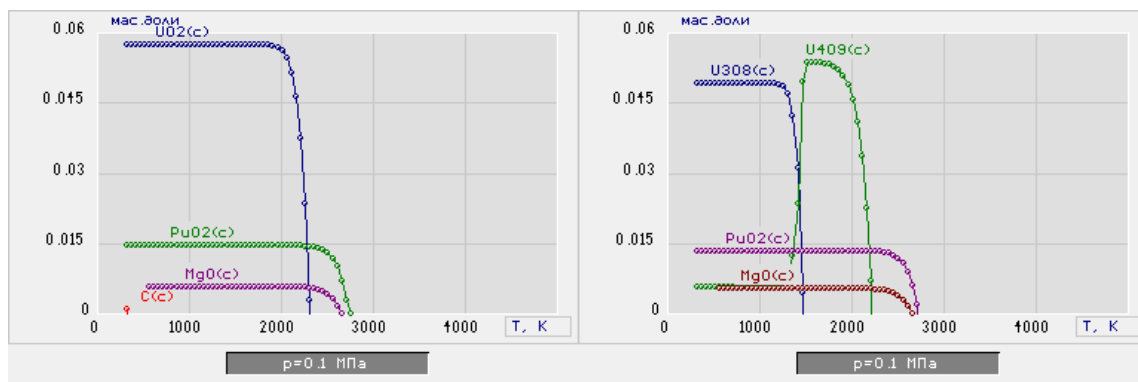


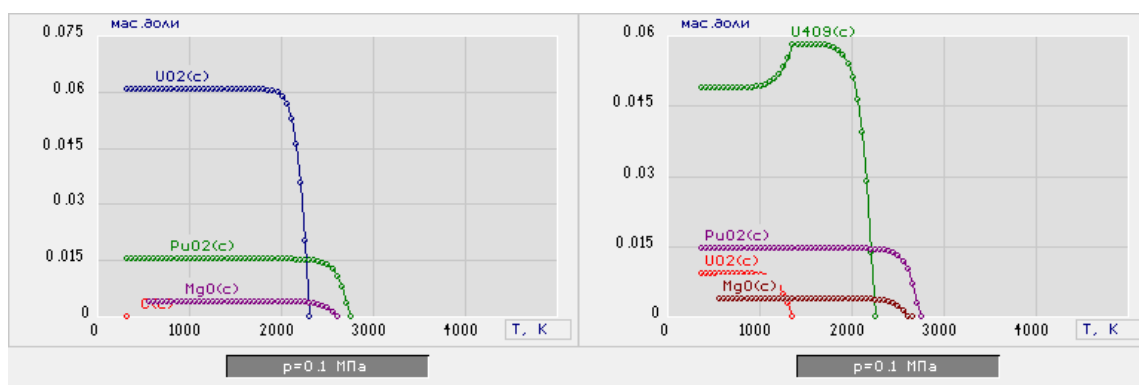
Рисунок 2.2 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-1 на основе ацетона при массовой доле воздуха 62 % (а) и 65 % (б).



а)

б)

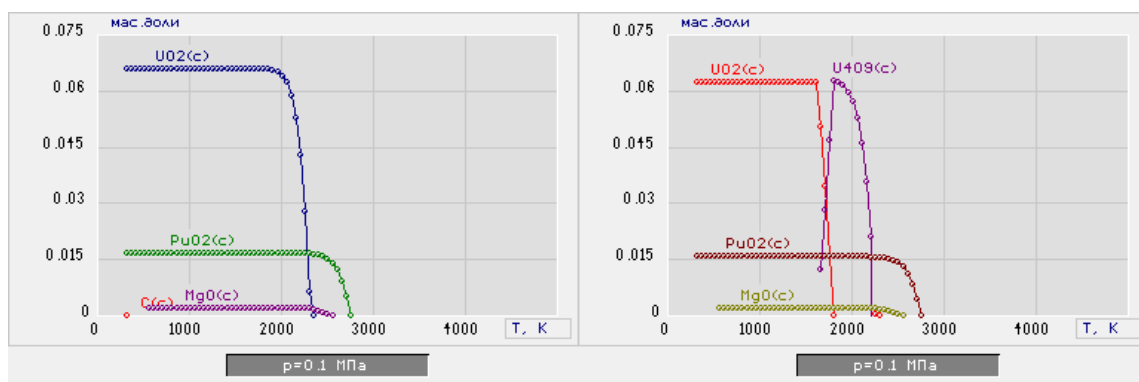
Рисунок 2.3 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-4 на основе ацетона при массовой доле воздуха 62 % (а) и 65 % (б).



а)

б)

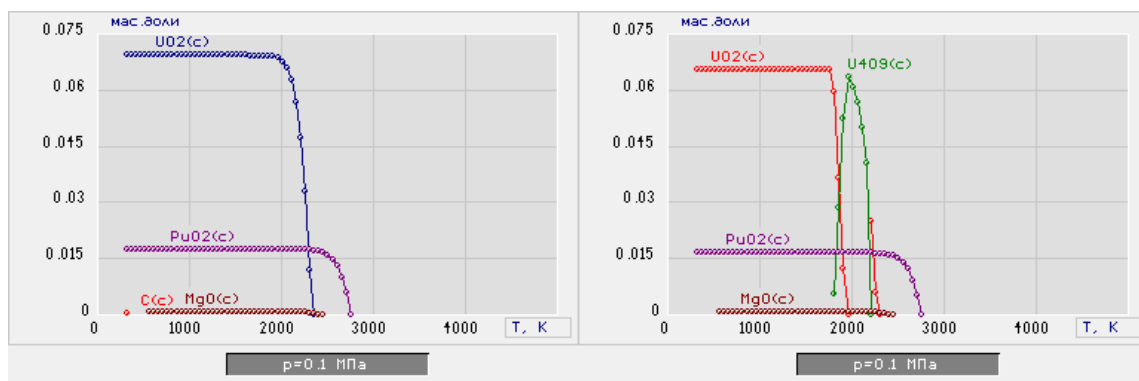
Рисунок 2.4 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-7 на основе ацетона при массовой доле воздуха 62 % (а) и 65 % (б)



а)

б)

Рисунок 2.5 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-9 на основе ацетона при массовой доле воздуха 62 % (а) и 65 % (б).



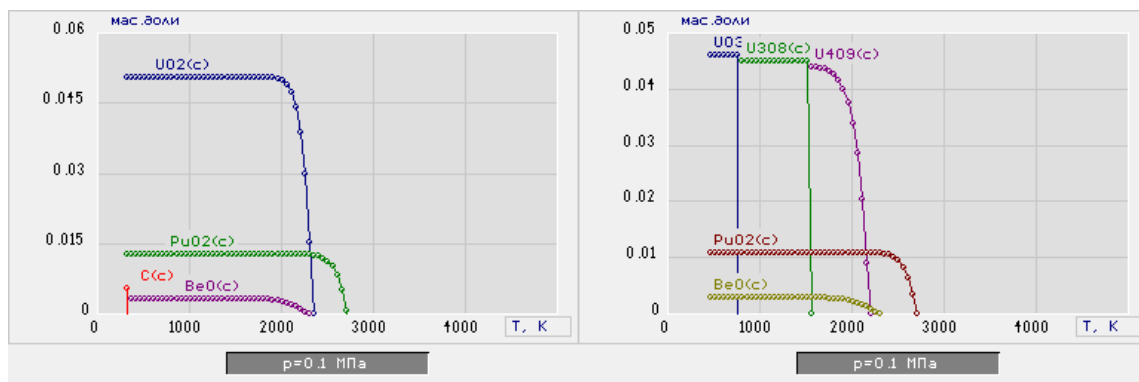
а)

б)

Рисунок 2.6 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-11 на основе ацетона при массовой доле воздуха 62 % (а) и 65 % (б).

Из анализа равновесных составов продуктов плазменной переработки растворов ВОНР на основе ацетона (рис. 2.2–2.6) следует, что при массовой доле воздуха 65% основными продуктами в конденсированных фазах являются оксиды $\text{UO}_2(\text{c})$, PuO_2 и $\text{MgO}(\text{c})$, которые образуют требуемые оксидные композиции, ОК-1, ОК-4, ОК-7, ОК-9 и ОК-11. При этом также образуется углерод $\text{C}(\text{c})$, содержание которого резко возрастает при снижении массовой доли воздуха менее 62%. Повышение массовой доли воздуха с 65% до 70% и более не приводит к образованию углерода $\text{C}(\text{c})$ и не изменяет состав целевых продуктов. Дальнейшее повышение массовой доли воздуха свыше 70% приведет лишь к уменьшению содержания целевых продуктов и снижению производительности данного процесса.

На рисунке 2.7 представлены характерные равновесные составы продуктов плазмохимической переработки растворов ВОНР на основе этанола при массовой доле воздуха 65% и 70 %.



а)

б)

Рисунок 2.7 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-16 на основе этанола при массовой доле воздуха 65 % (а) и 70 %(б).

Из анализа равновесных составов продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-16 на основе этанола (рис. 2.7) следует, что при массовой доле воздуха 65% основными продуктами в конденсированных фазах также являются оксиды $\text{UO}_2(\text{с})$, PuO_2 и $\text{MgO}(\text{с})$, которые образуют требуемую оксидную композиции ОК-16. При этом также образуется углерод $\text{C}(\text{с})$, содержание которого резко возрастает при снижении массовой доли воздуха. Повышение массовой доли воздуха с 65% до 70% не приводит к образованию углерода $\text{C}(\text{с})$ и не изменяет состав целевых продуктов. Дальнейшее повышение массовой доли воздуха свыше 70% приведет лишь к уменьшению содержания целевых продуктов и снижению производительности данного процесса.

3 Экспериментальная часть

3.1 Лабораторный стенд для проведения исследований

Экспериментальные исследования процесса синтеза топливных ОК в воздушно-плазменном потоке проводились при использовании лабораторного стенда «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01», представленном на рисунке Б1 (Приложение Б).

В состав плазменного стенда входит высокочастотный генератор с

рабочей частотой 13,56 МГц и колебательной мощностью до 60 кВт. Генерируемая энергия передается от него на охлаждаемый водой медный электрод ВЧФ-плазмотрона, через разрядную камеру которого продувается плазмообразующий газ – воздух. Среднемассовая температура воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном, не превышает 4000 К. Кварцевая трубка (длина – 0,86; диаметр – 0,05 м) выполняет функцию разрядной камеры плазмотрона [12].

Через реактор и ВЧФ-плазмотрон осуществляется прокачка воздуха при помощи высоконапорного вытяжного вентилятора. Закрутка поступающего в разрядную камеру потока воздуха осуществляется импеллером, который расположен в узле ввода, расположенном на входе в плазмотрон. Постоянная входная площадь импеллера ($S_{\text{иг}}$) составляет 0,0025 м². Импеллер реактора снабжен шибером, с помощью которого регулируется входная площадь импеллера ($S_{\text{им}}$) в диапазоне от 0 до 1650 см².

Работающий реактор является источником загрязняющих веществ, например монооксиды углерода и азота, диоксиды азота и серы и углеводороды. Для контроля их содержания в отходящих газах используются газоанализатор и пробоотборник. Значения скоростей воздушного потока в ВЧФ-плазмотроне и газоходe (диаметр – 0,25 м, площадь ($S_{\text{гхд}}$) – 0,05 м²) измеряются трубкой Пито.

Измерение температуры горения диспергированных ВОНР в реакторе осуществляется бесконтактным способом по линии поглощения образующегося CO₂ при помощи высокоточного цифрового пирометра IPE-140/45.

3.2 Определение расхода плазмообразующего газа через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона

Расход воздуха через воздуховод определяется с помощью трубки Пито (рисунок 2.8).

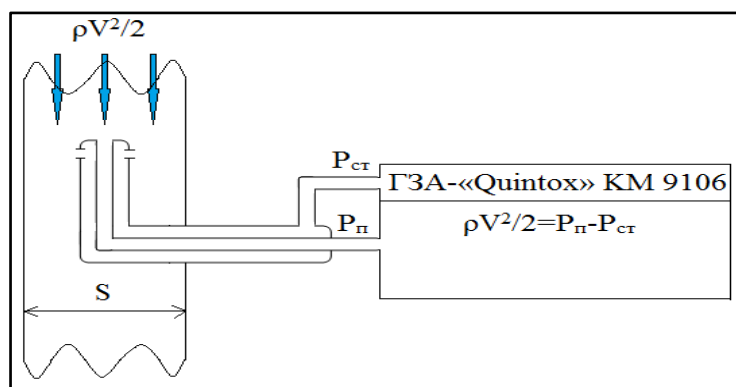


Рисунок 2.8 – Схема определения расхода воздуха в воздуховоде с помощью трубки Пито

Трубка Пито измеряет напор, создаваемый набегающим потоком воздуха по следующей формуле:

$$f = \frac{\rho V^2}{2} = P_{\text{п}} - P_{\text{ст}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{п}}$ – полное давление, Па;

$P_{\text{ст}}$ – статическое давление, Па;

ρ – плотность воздуха при температуре T , кг/м³;

$f = \frac{\rho V^2}{2}$ – напор, создаваемый набегающим потоком воздуха.

Из формулы 3 определяется скорость набегающего потока:

$$V = \left[\frac{2(P_{\text{п}} - P_{\text{ст}})}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Далее рассчитывается объёмный (или массовый) расход воздуха через воздуховод по формуле:

$$Q = S \cdot V, \quad (5)$$

где S – площадь поперечного сечения воздуховода.

Графики зависимости напора, создаваемого набегающим потоком воздуха, от величины входной площади шиберов реактора приведены на рисунках 2.9, 2.10.

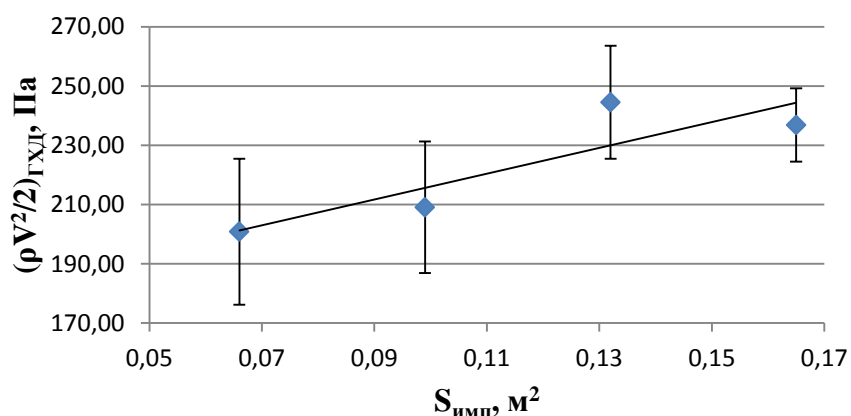


Рисунок 2.9 – Влияние входной площади импеллера реактора на напор, создаваемый набегающим потоком воздушного теплоносителя в газоходе

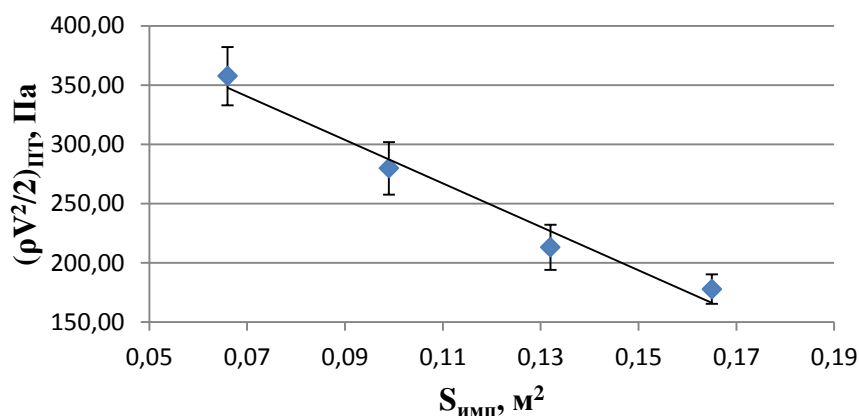


Рисунок 2.10 – Влияние входной площади импеллера реактора на напор, создаваемый набегающим потоком воздушного теплоносителя в разрядной камере ВЧФ-плазмотрона

По результатам полученных данных были построены графики расхода плазмообразующего газа (воздуха) через ВЧФ-плазмотрон ($Q_{\text{пт}}$), а также воздушного теплоносителя через газоход ($Q_{\text{гхд}}$) в зависимости от величины входной площади импеллера реактора. Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздуха через ВЧФ-плазмотрон и газоход представлено на рисунках 2.9 и 2.10.

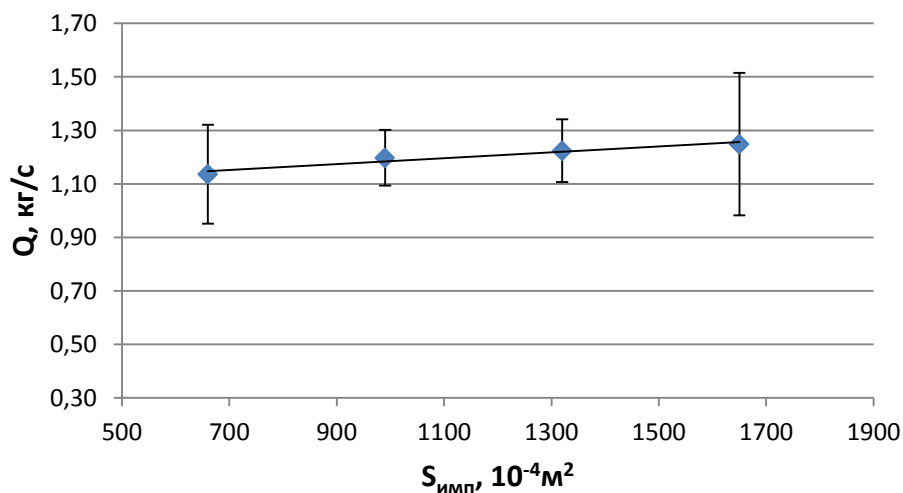


Рисунок 2.11 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон

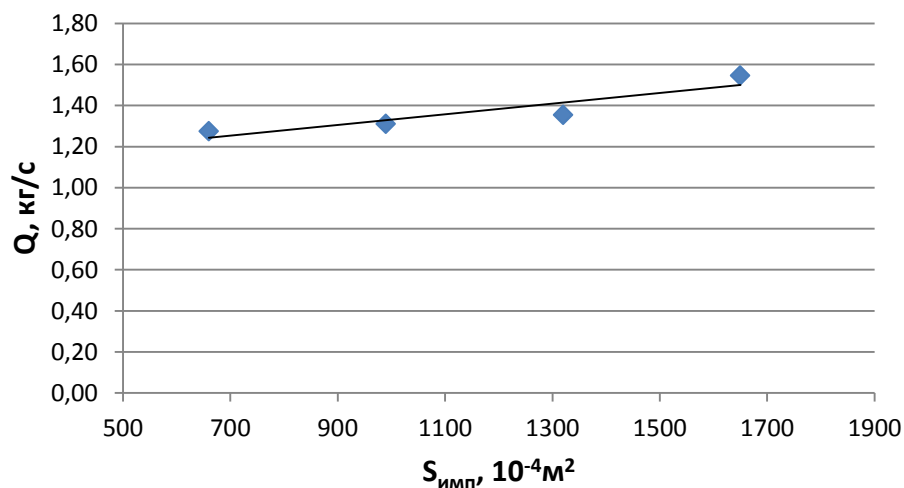


Рисунок 2.12 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через газоход

3.2 Расчет расхода газа через реактор

Для расчета расхода воздуха через реактор использовалось следующее выражение:

$$Q_R = Q_{\text{ГХД}} - Q_{\text{ПТР}}, \quad (6)$$

где Q_R – расход воздушного теплоносителя через реактор, кг/с;

$Q_{\text{ГХД}}$ – расход воздушного теплоносителя через газоход, кг/с;

$Q_{\text{ПТР}}$ – расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон, кг/с.

В результате расчетов получена зависимость расходов воздушного

теплоносителя через реактор плазменного стенда в зависимости от входной площади импеллера реактора. С помощью полученных данных был построен график зависимости расхода газа через реактор от площади шибера, который представлен на рисунке 2.13.

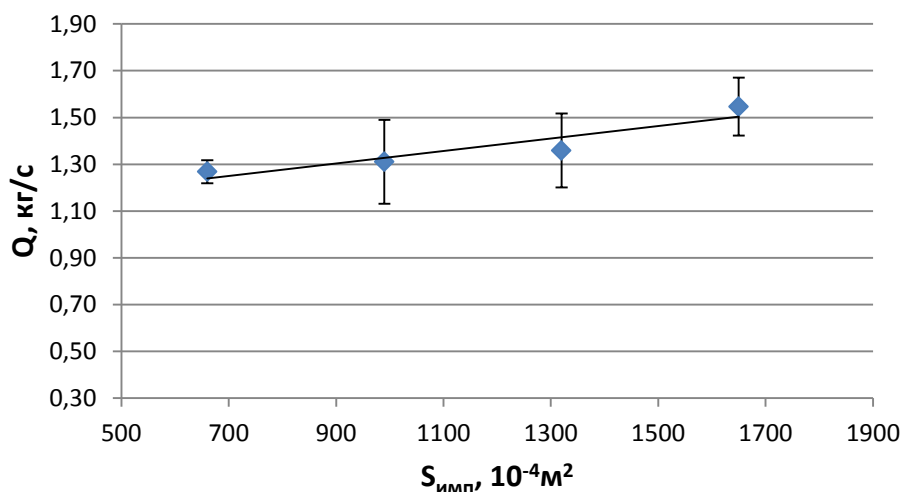


Рисунок 2.13 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через газоход

Полученная зависимость позволяет за счет изменения шибером входной площади импеллера реактора осуществлять плавную регулировку расхода воздушного теплоносителя через реактор и плазмотрон.

3.3 Расчет основных технологических параметров установки

При расчете технологических параметров работы установки использовались следующие соотношения.

Мощность, потребляемая ВЧГ от промышленной сети:

$$P_0 = I_a U_a, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где I_a – ток анода, А;

U_a – напряжение на аноде генераторной лампы, кВ.

Мощность, выделяемая на различных узлах установки (анод генераторной лампы (а), сеточная индуктивность (с), электрод (э), корпус (к)):

$$P_i = m_i C \Delta t_i \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (8)$$

где m_i – массовый расход охлаждающей воды, кг/с;

C – теплоемкость воды, ккал/кг·°C,

Δt_i – изменение температуры охлаждающей воды, °C.

Мощность ВЧФ-разряда рассчитывалась по формуле:

$$P_p = P_0 - (P_a + P_c + P_z), \text{ кВт.} \quad (9)$$

Мощность плазменной струи есть разность между мощностью ВЧФ-разряда и мощностью, выделяющейся на корпусе плазмотрона:

$$P_{ст} = P_p - P_k, \text{ кВт.} \quad (10)$$

Энтальпия плазменной струи:

$$H = H_0 + \frac{P_{разр}}{Q_{пг}}, \text{ кДж/кг,} \quad (11)$$

где H_0 – энтальпия газовой смеси при температуре 300 K;

$Q_{пг}$ – массовый расход плазмообразующего газа, кг/с.

Коэффициент полезного действия ВЧФ-плазмотрона:

$$\eta = \left(\frac{P_{ст}}{P_p} \right) \cdot 100, \%. \quad (12)$$

Установочный коэффициент полезного действия плазменного стенда:

$$\eta = \left(\frac{P_{ст}}{P_0} \right) \cdot 100, \%. \quad (13)$$

3.4 Плазмохимическая переработка модельных растворов

Для исследования возможности проведения процесса синтеза порошков высокой степени дисперсности в воздушной высокочастотной плазме в форме гомогенных по составу уран-плутоний оксидных композиций было проведено экспериментальное изучение процесса на модельных азотнокислых растворах с использованием имитаторов [13]. Для подготовки растворов ВОНР использовались соли нитрата самария ($\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) вместо нитрата плутония, нитрата неодима ($\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) вместо нитрата урана, а также соль нитрата магния ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для образования матрицы в виде оксида магния в составе ОК. Использование самария и неодима объясняется тем, что он находится в одной группе периодической

таблицы с плутонием и ураном, а в растворах формирует сложные ионы, сходные по свойствам с делящимся элементом.

В качестве горючего органического компонента использовался ацетон. Это объясняется тремя факторами: высокой теплотворной способностью, высокой взаимной растворимостью, а также доступностью.

Вначале готовился с использованием дистиллированной воды (1 л) водный нитратный раствор (ВНР) из нитратных солей металлов и смешивался с органическим компонентом (3 л) с получением раствора ВОНР. Полученные водные суспензии ОК помещали в емкости из нержавеющей стали, отбирали пробы для определения гранулометрического состава суспензий методом лазерной дифракции (ЛД). Затем водные суспензии ОК отстаивали, полученные осадки отделяли, фильтровали и прокаливали в течение 20 минут при температуре 120-150 °С.

3.5 Анализ полученных результатов

Исследования морфологических, структурных, кристаллических и технологических свойств порошков ОК проводили на базе аналитического оборудования Центра коллективного пользования НОИЦ НМНТ ИШНПТ ТПУ (3140 – Научно-образовательный инновационный центр «Наноматериалы и нанотехнологии», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»).

Для определения гранулометрического состава частиц ОК в полученных водных суспензиях использовали метод лазерной дифракции (метод ЛД), реализованный на приборе SALD-7101 (Shimadzu, Япония). Для сопоставления с режимами и другими свойствами порошков использовали количественный результат в виде медианного значения полученного распределения, равного широко применяемому в производстве техническому параметру « D_{50} ». Поскольку использованный метод позволяет определить

размер частиц в суспензии (взвеси), независимо от их структурного строения, включая жёсткие агломераты, этот результат использовали для определения степени агломерации исследуемых порошков ОК.

Величину удельной поверхности исследуемых порошков ОК оценивали методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ-анализ) на приборе Сорби-М (ЗАО «МЕТА», Россия). Полученные данные пересчитывали в размер частиц, исходя из предположения об их сферической геометрии.

Рентгенофазовый анализ (РФА) исследуемых порошков ОК проводили на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония) с применением стандартной базы данных кристаллических структур неорганических материалов PDF-4, в свободно распространяемом программном обеспечении PowderCell по алгоритму Ритвельда для полнопрофильного анализа рентгеновских дифрактограмм. Определяли фазовый состав порошков ОК, параметры кристаллической структуры обнаруженных фаз, а также средние размеры областей когерентного рассеяния (ОКР, кристаллитов). Отношение последних к размеру частиц ОК по данным БЭТ-анализа характеризует морфологию и развитость поверхности частиц и может быть выражено количественно коэффициентом гигроскопичности K : форма частиц, для которых этот коэффициент меньше или приближается к единице, близка к равноосной; коэффициент больше единицы характеризует частицы с развитой поверхностью и/или с внутренними порами; коэффициент меньше единицы характеризует плотные агломераты, состоящие из нескольких кристаллитов. Степень агломерированности таких частиц количественно характеризует коэффициент агломерации Q , величина которого определяется как отношение размера частиц ОК (метод ЛД) к размеру ОКР (количество кристаллитов на линейном поперечном размере частицы ОК).

На рисунке 2.14 представлена характерная гистограмма распределения по размерам частиц водной суспензии ОК-8 (метод ЛД), полученной при переработке раствора ВОНР.

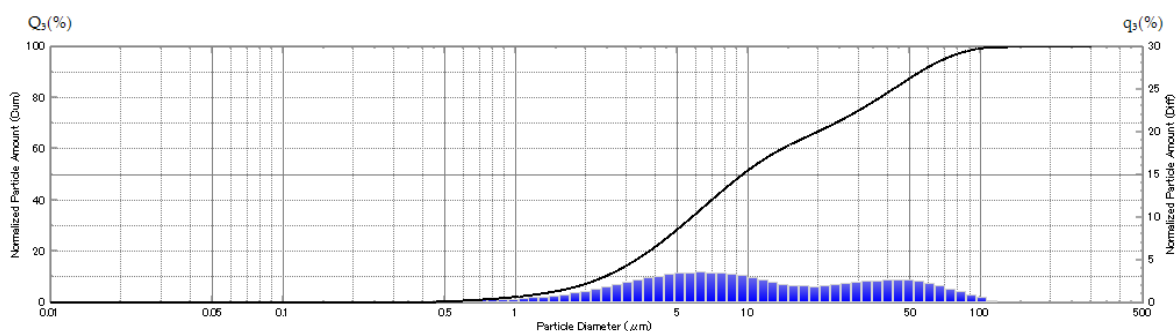


Рисунок 2.14 – Гистограммы распределения по размерам частиц водной суспензии ОК-8

Исследуемые водные суспензии характеризуются достаточно широким распределением по размерам, распределение для частиц водной суспензии ОК-8 имеет два достаточно выраженных максимума (6 мкм и 45 мкм). Характерные величины медианных значений распределения частиц для ОК-8 лежат в диапазоне от 1–95 мкм. Среднее значение размера частиц D_{50} для ОК-8 составляет 9,4 мкм.

Анализ рентгенограмм образцов порошков после проведения РФА показывает, что основными продуктами проб порошков ОК-8 являются целевые оксиды неодима (Nd_2O_3), самария (Sm_2O_3) и магния (MgO). Средний размер ОКР для проб порошка ОК-8 равен 92 нм.

СЭМ-изображение синтезированных порошков ОК-8 представлено на рисунке 2.15

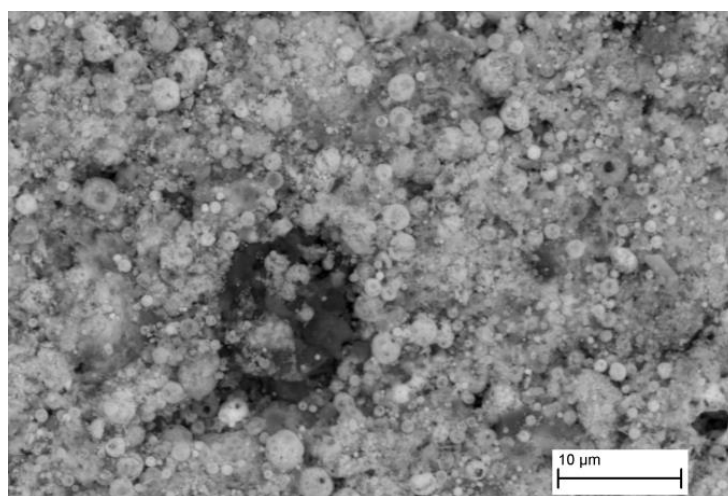


Рисунок 2.15 – СЭМ-изображение морфологической структуры частиц порошка ОК-8

Анализ СЭМ-изображений подтверждает достаточно широкий диапазон размеров частиц, наличие различных фаз, мелких плотных частиц. Микроскопия показывает, что форма частиц – округлая.

Величина площади удельной поверхности по методу БЭТ для проб ОК-8 составила $15,3 \text{ м}^2/\text{г}$. Полученные значения площади пересчитывались в размер частиц, исходя из предположения об их сферической геометрии. Таким образом, размер частиц, определенный по БЭТ, для ОК-8 составляет 53 нм.

Насыпная плотность исследуемых проб порошков определялась по ГОСТ 27801-93 и для ОК-8 составила $0,473 \text{ г/см}^3$. Свойства прессуемости, найденные по результатам прессования порошков, имеют характерные для большинства оксидных материалов значения: уплотняемость порошка ОК-8 составляет 0,091; порошки принадлежит к 4 группе сложности прессования.

Таким образом, производство из этих порошков керамических таблеток возможно при использовании серийно выпускаемого оборудования и пресс-форм из углеродистой инструментальной стали.

Прессование порошковых материалов проводилось в стальной цилиндрической пресс-форме диаметром 10 мм под давлением 400 МПа с последующим спеканием полученных прессовок при температуре 1300 °С. Микрофотографии спеченной керамики приведены на рисунке 2.16.

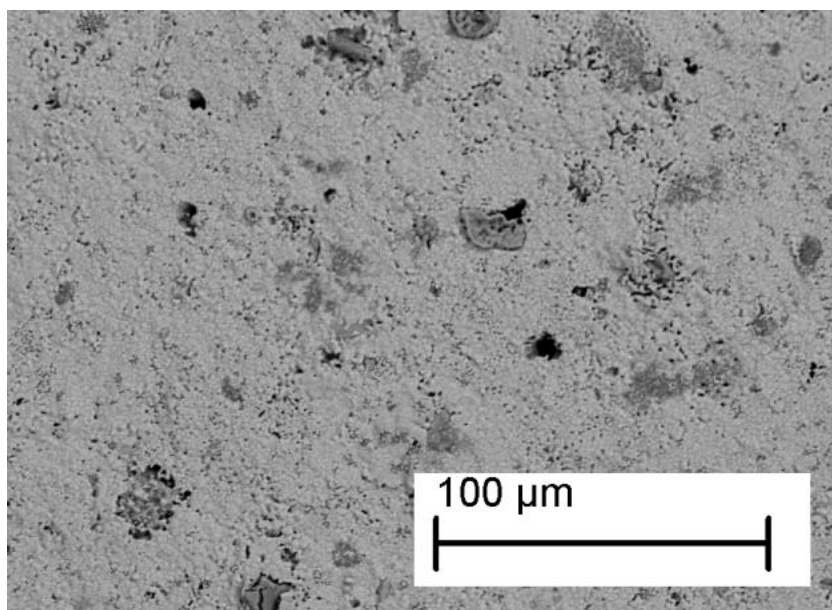


Рисунок 2.16 – Микрофотографии спеченной керамики из порошков ОК-8

На рисунках 24-28 показано влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц ОК в водных суспензиях (метод ЛД), удельной поверхности и размера кристаллитов в составе полученных порошков ОК – (1-33) (БЭТ-анализ).

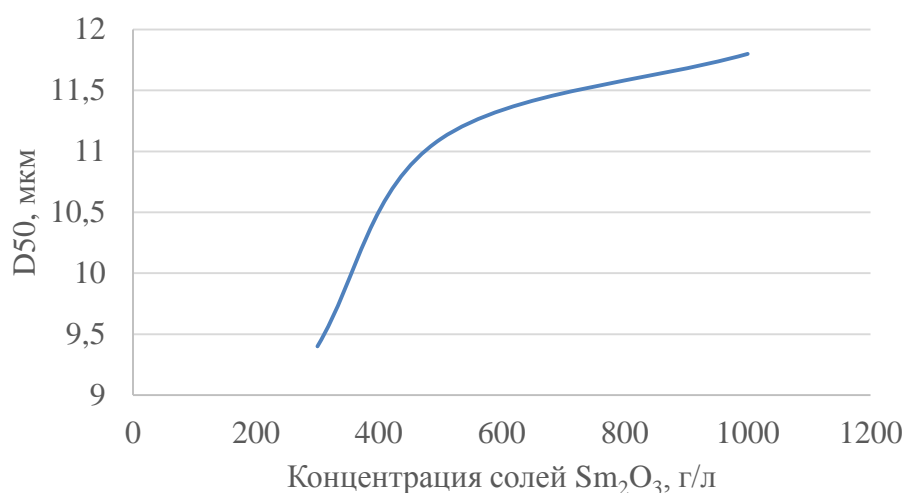


Рисунок 2.17 – Влияние содержания Sm_2O_3 на размер D50 для ОК–1,2,3 (метод ЛД)

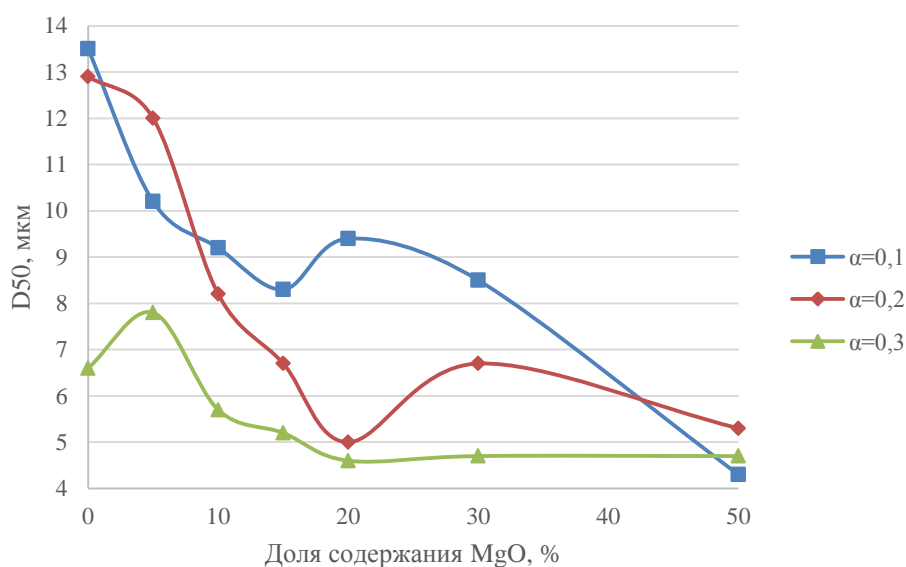


Рисунок 2.18 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц в полученных водных суспензиях ОК – (4-24) (метод ЛД) при $\alpha=0,1$; 0,2; 0,3.

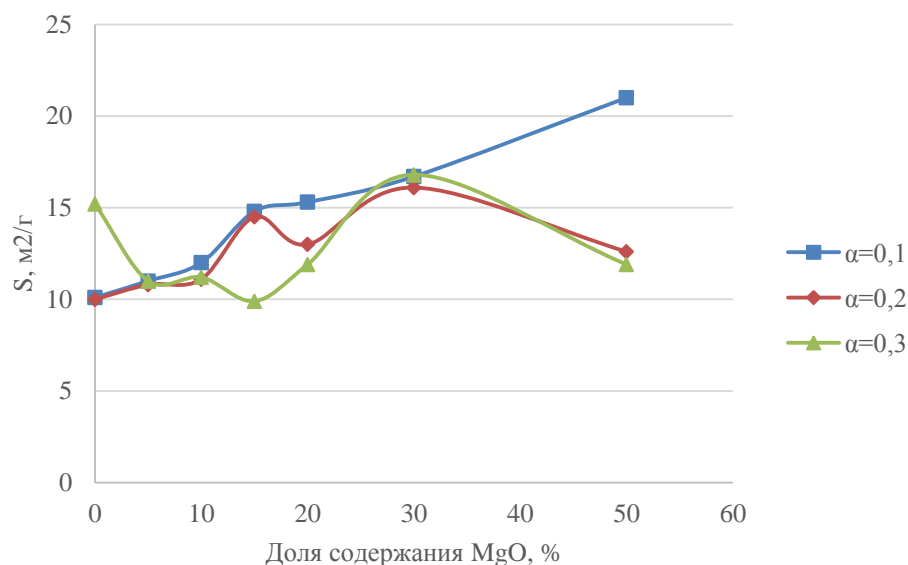


Рисунок 2.19 – Влияние содержания матрицы (MgO) на удельную поверхность и размер кристаллитов в составе порошков ОК – (4-24) (БЭТ-анализ) при $\alpha=0,1$; $0,2$; $0,3$.

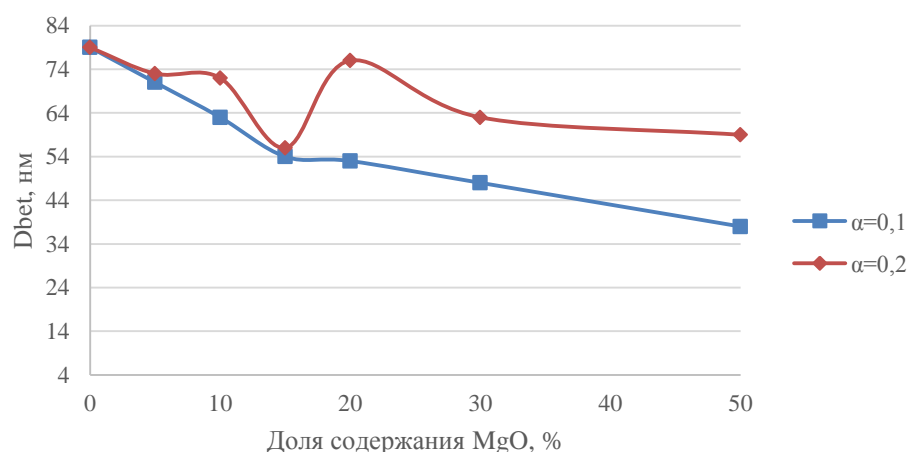


Рисунок 2.20 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер кристаллитов в составе полученных порошков ОК – (4-17) (БЭТ-анализ) при $\alpha=0,1$; $0,2$.

- Увеличение исходной концентрации солей металлов (Sm) с 300 г/л до 1500 г/л в растворах ВОНР-1,2,3 приводит к увеличению размера образующихся частиц оксида самария с 9,4 мкм до 11,8 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК–1,2,3 снижается с 12,1 м²/г до 7,6 м²/г, а размер частиц увеличивается с 62 нм до 95 нм (БЭТ).
- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от нуля до 50 % в составе

ОК–4,5,6,7,8,9,10 (при $\alpha=0,1$), полученных из растворов ВОНР-4,5,6,7,8,9,10, приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 13,5 мкм до 4,3 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК–4,5,6,7,8,9,10 увеличивается с 10,1 м²/г до 21,0 м²/г, а размер частиц снижается с 79 нм до 38 нм (БЭТ).

- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от нуля до 50 % в составе ОК–11,12,13,14,15,16,17 (при $\alpha=0,2$), полученных из растворов ВОНР-11,12,13,14,15,16,17, также приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 12,9 до 5,3 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК–11,12,13,14,15,16,17 увеличивается с 10,0 м²/г до 12,6 м²/г, а размер частиц снижается с 79 нм до 63 нм (БЭТ-анализ).

- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от нуля до 50 % в составе ОК (при $\alpha=0,3$), полученных из растворов ВОНР-18,19,20,21,22,23,24, также приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 6,6 до 4,7 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК–18,19,20,21,22,23,24 также уменьшается с 15,2 м²/г до 11,9 м²/г (БЭТ).

На рисунке 2.20 показано влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц ОК–25,26,27,28,29,30,31,32,33 в водных суспензиях (метод ЛД)

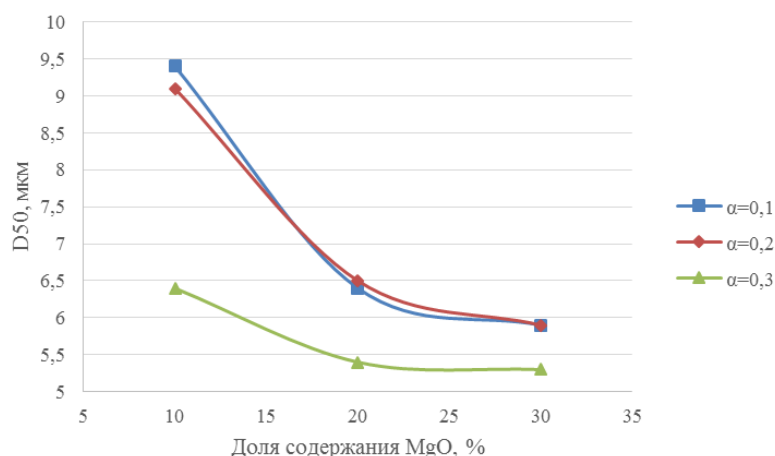


Рисунок 2.20 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц в полученных водных суспензиях ОК – (25-33) (метод ЛД) при $\alpha=0,1$; 0,2; 0,3.

С помощью полученных результатов, представленных на рисунке 2.20 можно сказать, что:

- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК (при $\alpha=0,1$), полученных из растворов ВОНР-25,26,27 приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 9,4 мкм до 5,9 мкм (ЛД).
- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК–28,29,30 (при $\alpha=0,2$), полученных из растворов ВОНР-28,29,30, приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 9,1 до 5,9 мкм (ЛД).
- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК–31,32,33 (при $\alpha=0,3$), полученных из растворов ВОНР-31,32,33, приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 6,4 до 5,3 мкм (метод ЛД).

Это позволяет предположить, что плазменная переработка диспергированных растворов данных ВОНР в воздушно-плазменном потоке также приводит к плазмохимическому синтезу наноразмерных ОК.

3.6 Выводы

1. С учетом результатов проведенного обзора литературы и анализа методов отдельного и совместного получения оксидных композиций рекомендован плазмохимический синтез оксидных композиций для дисперсионного уран-плутониевого ядерного топлива из диспергированных водно-органических нитратных растворов металлов, включающих делящиеся металлы, металл матрицы и органический компонент.

2. По результатам проведенных теплотехнических расчетов установлены закономерности влияния органического компонента (ацетон, этанол) на показатели горючести водно-органических нитратных растворов и определены составы растворов ВОНР, обеспечивающие энергоэффективный синтез оксидных композиций «PuO₂-UO₂-MgO» заданного состава.

3. В результате проведенного термодинамического моделирования процесса плазменной переработки растворов ВОНР в широком диапазоне температур (300÷4000) К установлены закономерности влияния массовой доли воздушного теплоносителя на состав образующихся продуктов, проведена оценка энергозатрат на процесс и определены условия,

обеспечивающие в воздушной плазме плазмохимический синтез оксидных композиций «PuO₂-UO₂-MgO» заданного состава.

4. Проведены экспериментальные исследования процесса синтеза оксидных композиций «PuO₂-UO₂-MgO» в воздушно-плазменном потоке из диспергированных растворов ВОНР, включающих самарий (вместо плутония) и неодим (вместо урана) и исследованы физико-химические и технологические свойства полученных образцов порошков. Установлены закономерности влияния массовой доли матрицы (оксид магния) на размер образующихся кристаллитов в составе оксидных композиций «Sm₂O₃-Nd₂O₃-MgO». Показано, что плазменная переработка диспергированных растворов ВОНР в воздушно-плазменном потоке позволяет осуществлять плазмохимический синтез наноразмерных порошков оксидных композиций с высокими физико-химическими и технологическими свойствами.

3.7 Заключение

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза из диспергированных водно-органических нитратных растворов наноразмерных оксидных композиций для дисперсионного уран-плутониевого ядерного топлива.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель дипломной работы: исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного МОХ-топлива.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта по апробации метода получения оксидных композиций для дисперсионного МОХ-топлива в плазме.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Определить потенциальных потребителей результатов исследования.
- 2) Провести анализ конкурентных технических решений.
- 3) Выполнить SWOT-анализ: описать сильные и слабые стороны проекта, выявить возможности и угрозы для реализации проекта.
- 4) Оценить степень готовности научной разработки к коммерциализации.
- 5) Построить календарный план-график проведения работ научно-исследовательского проекта.
- 6) Рассчитать бюджет научного исследования.
- 7) Определить ресурсную, финансовую, бюджетную, социальную и экономическую эффективности исследования.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В процессе написания магистерской диссертации были определены потенциальные потребители результатов исследования. К ним можно отнести предприятия по фабрикации ядерного топлива, АЭС

эксплуатирующие данные вид ядерного топлива, основная цель которых, это производство электрической энергии.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования ультракороткоживущих изотопов. Результаты сегментирования представлены в рисунке 4.1.

| | | Синтез УКЖИ ^{11}C | | | |
|-------------|---------|------------------------------------|-----------------------|-----------------|-------------|
| | | Исследовательские ядерные реакторы | Промышленные реакторы | Научная отрасль | Металлургия |
| Потребность | Сильная | | | | |
| | Слабая | | | | |

Рисунок 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию дисперсионного ядерного топлива

Из анализа карты можно сделать вывод, что наибольшую потребность в данных изотопах испытывают отрасли, связанные с ядерными реакторами и наукой. К сожалению, использование дисперсионного МОХ-топлива в металлургии не получило должного развития. На данный момент атомная отрасль испытывает проблему с низкой теплопроводностью, радиационной стойкостью топливных элементов, поэтому необходимы исследования, связанные с совершенствованием материалов для фабрикация ядерного топлива. С учетом дальнейшего развития атомной энергетики потребность в модернизации ядерного топлива в ближайшее время будет расти.

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в

разрабатываемый объект. Чтобы выявить ресурсоэффективность разработки и определить направления для ее будущего повышения, необходимо провести анализ конкурентных технических решений с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 4.1. В таблице представлены следующие показатели конкурентоспособности: плазмохимический синтез оксидных композиций для дисперсионного МОХ-топлива (П), золь-гель метод получения оксидной композиции (З), метод химического осаждения (Х). Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – слабая позиция, а 5 – сильная. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

| Критерии оценки | Вес критерия | Баллы | | | Конкурентоспо-собность | | |
|---|--------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|
| | | Б _п | Б _з | Б _х | К _п | К _з | К _х |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Технические критерии оценки ресурсоэффективности | | | | | | | |
| 1.Повышение производительности труда | 0,25 | 5 | 5 | 2 | 0,75 | 0,75 | 0,50 |
| 2.Удобство в эксплуатации | 0,12 | 5 | 5 | 2 | 0,60 | 0,60 | 0,24 |
| 3. Энергоэкономичность | 0,10 | 4 | 4 | 3 | 0,40 | 0,40 | 0,30 |
| 4. Надежность | 0,12 | 3 | 3 | 5 | 0,36 | 0,36 | 0,60 |
| 5.Простота эксплуатации | 0,14 | 5 | 5 | 2 | 0,70 | 0,70 | 0,28 |
| Экономические критерии оценки эффективности | | | | | | | |
| 1. Конкурентоспособность продукта | 0,07 | 5 | 4 | 2 | 0,35 | 0,28 | 0,14 |
| 2. Уровень проникновения на рынок | 0,07 | 3 | 2 | 5 | 0,21 | 0,14 | 0,35 |

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 3. Цена | 0,08 | 5 | 4 | 3 | 0,40 | 0,32 | 0,24 |
| 4. Предполагаемый срок эксплуатации | 0,05 | 3 | 3 | 5 | 0,15 | 0,15 | 0,25 |
| Итого | 1 | 38 | 35 | 29 | 3,92 | 3,70 | 2,90 |

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

(5.2.1)

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Коэффициент конкурентоспособности предприятия:

$$k_K = \frac{K_{\Pi}}{K_{3Хср}} = \frac{3,92}{(3,70 + 2,90) / 2} = 1,19.$$

(5.2.2)

Так как $k_K > 1$, следовательно, предложенный метод получения оксидных композиций для ядерного топлива конкурентоспособен. Золь-гель метод является основным промышленным способом синтеза данных материалов. Результаты данной магистерской работы могут быть использованы для апробации новой технологии синтеза плазмохимическим методом.

4.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой сводную таблицу, иллюстрирующую связь между внутренними и внешними факторами компании. Целью данного анализа является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или

могут появиться в его внешней среде.

В таблице 4.2 приведена матрица SWOT-анализа для синтеза оксидных композиций с помощью плазмохимического метода.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT

| | Сильные стороны С1. Предварительное моделирование. С2. Одностадийность процесса. С3. Экологичность метода. | Слабые стороны Сл1. Затраты на отработку технологии и ее внедрение. Сл2. Сложность конструкции технологического оборудования. |
|--|--|--|
| Возможности В1. Создание рынка по методам получения топливных оксидных композиций. В2. Рост спроса со стороны предприятий топливного дивизиона Росатома. | В1С1 Синтез разнообразных оксидных композиций для ядерной энергетики. В2С3 Высокий выход целевого продукта. В2С2 Использование практически всего объема исходного раствора. | В1Сл1 Необходимость отработки технологии для получения лицензии на производство ядерных материалов. В2Сл2 Высокая вероятность износа конструктивных элементов при непрерывной работе. |
| Угрозы У1. Усовершенствования конкурентных технических решений. У2. Несвоевременное финансовое обеспечение. | У1С1 Возможность оптимизации метода лазерной сублимации для синтеза оксидных композиций. У2С2 Привлечение дополнительного финансирования со стороны государства на увеличение мощности технологического оборудования. | У1Сл1 Финансирование технологий отработанных на протяжении десятков лет. У2Сл2 Возможность возникновения простоя производства в случае поломки. |

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективными в сложившейся ситуации являются следующие стратегии:

1. Необходимо отрабатывать проектируемую технологию синтеза оксидных композиций для получения лицензии на производство ядерных материалов;
2. Необходимо обеспечить запас комплектующих для своевременной замены при поломке оборудования.

4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Далее была проведена оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации и выяснение уровня собственных знаний для ее проведения. Для этого была заполнена специальная форма, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенций разработчика научного проекта. Форма представлена в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

| № п/п | Наименование | Степень проработанности научного проекта | Уровень имеющихся знаний у разработчика |
|-------|---|--|---|
| 1. | Определен имеющийся научно-технический задел | 4 | 3 |
| 2. | Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела | 3 | 3 |
| 3. | Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке | 5 | 5 |
| 4. | Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок | 5 | 5 |
| 5. | Определены авторы и осуществлена охрана их прав | 5 | 5 |
| 6. | Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности | 1 | 1 |
| 7. | Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта | 1 | 1 |
| 8. | Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки | 1 | 1 |
| 9. | Определены пути продвижения научной разработки на рынок | 3 | 5 |
| 10. | Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки | 2 | 5 |
| 11. | Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок | 1 | 5 |
| 12. | Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот | 1 | 4 |
| 13. | Проработаны вопросы | 4 | 4 |

| | | | |
|-----|---|----|----|
| | финансирования коммерциализации научной разработки | | |
| 14. | Имеется команда для коммерциализации научной разработки | 4 | 5 |
| 15. | Проработан механизм реализации научного проекта | 2 | 5 |
| | ИТОГО БАЛЛОВ | 42 | 57 |

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (5.4.1)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение $B_{\text{сум}}$ получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже

среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что перспективность коммерциализации данного НТИ находится на среднем уровне. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта, которая включает в себя анализ рынков сбыта, разработку бизнес-плана и т.д.

4.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Выделяют следующие методы коммерциализации научных разработок:

- Торговля патентными лицензиями, т.е. передача третьим лицам права использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе.

- Передача ноу-хау, т.е. предоставление владельцем ноу-хау возможности его использовать другим лицом, осуществляемое путем раскрытия ноу-хау.

- Инжиниринг предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг.

- Франчайзинг, т.е. передача или переуступка разрешения продавать чьи-либо товары или оказывать услуги в некоторых областях.

- Организация собственного предприятия.

- Передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия.

- Организация совместного предприятия, т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия.

— Организация совместных предприятий, работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».

Таким образом, для данного научно-технического исследования наиболее предпочтительным является такой метод коммерциализации как торговля патентными лицензиями. Так как лицензиар не вкладывает собственных средств в производство, следовательно, не несет расходов по сбыту и т.д. Поскольку НТИ проводится по гранту госкорпорации РОСАТОМ, то такая технология синтеза может быть передана третьим лицам (топливные компании Росатома) с последующим правом его использования с учетом интересов лицензиата. Как правило, лицензиатом выступает госкорпорация Росатом, заинтересованная в получении ядерного топлива с высокой теплопроводностью и радиационной стойкостью.

4.6 Инициация проекта

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1) Цели и результат проекта.

Приведем информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в таблице 5.4.

Таблица 4.4 – Заинтересованные стороны проекта

| Заинтересованные стороны проекта | Ожидания заинтересованных сторон |
|----------------------------------|---|
| Частные инвесторы | Увеличение удельной энергоёмкости нового вида топлива |
| РОСАТОМ | Получение оксидных композиций для производства ядерного топлива |

В таблице 4.5 представлена информация об иерархии целей проекта и

критерия достижения целей.

Таблица 4.5 – Цели и результаты проекта

| | |
|--------------------------------------|--|
| Цели проекта: | Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного МОХ-топлива |
| Ожидаемые результаты проекта: | Получение оксидных композиций для дисперсионного МОХ-топлива |
| Критерии приемки результата проекта: | Получение оксидных композиций с требуемым составом |
| Требования к результату проекта: | Требование: |
| | Высокая удельная поверхность |
| | Высокая радиационная стойкость |

2) Организационная структура проекта.

Далее определены участники рабочей группы данного проекта, роль каждого участника в данном проекте, а также функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Рабочая группа проекта

| № п/п | ФИО, основное место работы, должность | Роль в проекте | Функции | Трудозатраты, час. |
|--------|---|---|------------------------------------|-----------------------|
| 1 | Расторгуев В.И., ТПУ, магистр | Исследование процесса плазмохимическо го синтеза оксидных композиций | Основной разработчик проекта | 584 |
| 2 | Каренгин А.Г., ТПУ, доцент | Консультации по основным вопросам темы | Руководитель проекта | 432 |
| ИТОГО: | | | | 1016 |

3) Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Данная информация представлена в таблице 5.7.

Таблица 4.7 – Ограничения проекта

| Фактор | Ограничения/ допущения |
|--------|------------------------|
|--------|------------------------|

| | |
|---|-----------------|
| 3.1. Бюджет проекта | 312043,9 рублей |
| 3.1.1. Источник финансирования | НИ ТПУ, РОСАТОМ |
| 3.2. Сроки проекта: | 3 месяца |
| 3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом | 25.02.2021 |
| 3.2.2. Дата завершения проекта | 31.05.2021 |

Таким образом, установлены цели и результаты проекта, рассмотрена организационная структура проекта, определены ограничения и допущения проекта.

4.7 Планирование управления научно-исследовательского проекта

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и инженер (И). После чего, в рамках проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в таблице 5.8.

Таблица 4.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

| Основные этапы | № раб | Содержание работ | Должность исполнителя |
|--|-------|--|-----------------------|
| Разработка технического задания | 1 | Составление и утверждение задания | И, НР |
| | 2 | Календарное планирование работ по теме | И, НР |
| | 3 | Изучение материалов по теме плазмохимического синтеза | И |
| Выбор направления исследований | 4 | Анализ литературных источников по МОХ топливу | И |
| | 5 | Выбор методов анализа оксидных композиций | И, НР |
| Теоретические и экспериментальные исследования | 6 | Проведение процесса плазмохимического синтеза с использованием плазмотрона | И, НР |
| | 7 | Анализ полученных результатов | И, НР |

| | | | |
|--------------------------------|---|------------------------------|---|
| Обобщение и оценка результатов | 8 | Составление отчета по работе | И |
|--------------------------------|---|------------------------------|---|

В рамках планирования научного проекта был построен календарный график проекта. Линейный график представлен в таблице 5.9.

Таблица 4.9 – Календарный план проекта










| Код работ | Название | Длительность, дни | Дата начала работ | Дата окончания работ | Состав участников |
|-----------|--|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1 | Составление и утверждение задания магистерской диссертации | 1 | 25.02.2021 | 26.02.2021 | Расторгуев В.И. Каренгин А.Г. |
| 2 | Календарное планирование работ по теме | 3 | 1.03.2021 | 3.03.2021 | Расторгуев В.И. Каренгин А.Г. |
| 3 | Изучение материалов по теме плазмохимического синтеза | 9 | 4.03.2021 | 12.03.2021 | Расторгуев В.И. |
| 4 | Анализ литературных источников по МОХ топливу | 10 | 15.03.2021 | 24.03.2021 | Расторгуев В.И. |
| 5 | Выбор методов анализа оксидных композиций | 5 | 25.03.2021 | 29.03.2021 | Расторгуев В.И. Каренгин А.Г. |
| 6 | Проведение процесса плазмохимического синтеза с использованием плазмотрона | 25 | 30.03.2021 | 23.04.2021 | Расторгуев В.И. Каренгин А.Г. |
| 7 | Анализ полученных результатов | 30 | 26.04.2021 | 25.05.2021 | Расторгуев В.И. Каренгин А.Г. |
| 8 | Составление отчета по работе | 6 | 26.05.2021 | 31.05.2021 | Расторгуев В.И. |
| ИТОГО: | | 89 | | | |

Диаграмма Ганта – тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы 5.10 с разбивкой по месяцам и

декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 4.10 – Календарный план-график проведения работ

| Код работ ы | Вид работ | Исполнител и | T_{ki} | Продолжительность выполнения работ | | | | | | | | | | | |
|----------------|--|-------------------------------|----------|------------------------------------|---|---|--|---|---|---|---|---|-----|---|---|
| | | | | февраль | | | март | | | апрель | | | май | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Составление и утверждение задания магистерской диссертации | Научный руководитель, инженер | 1 | | |  | | | | | | | | | |
| 2 | Календарное планирование работ по теме | Научный руководитель, инженер | 3 | | |  | | | | | | | | | |
| 3 | Изучение материалов по теме плазмохимического синтеза | Инженер | 9 | | | |  | | | | | | | | |
| 4 | Анализ литературных источников по МОХ топливу | Инженер | 10 | | | | |  | | | | | | | |
| 5 | Выбор методов анализа оксидных композиций | Научный руководитель, инженер | 5 | | | | | |  | | | | | | |
| 6 | Проведение процесса плазмохимического синтеза с использованием плазмотрона | Научный руководитель, инженер | 25 | | | | | |  |  | | | | | |
| 7 | Анализ полученных результатов | Научный руководитель, инженер | 30 | | | | | | | | |  | | | |
| 8 | Составление отчета по работе | Инженер | 6 | | | | | | | | | | | |  |

 – инженер,  – научный руководитель.

Таким образом, был построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и

состав участников.

4.8 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).

Отразим стоимости всех материалов, используемых при разработке проекта, включая расходы на их приобретение и, при необходимости, на доставку. Эти данные представлены в таблице 5.11

Таблица 4.11 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

| Наименование | Единица измерения | Кол-во | Цена за ед., руб. | Затраты на материалы, руб. |
|---------------------------------|-------------------|--------|-------------------|----------------------------|
| Бумага, формат А4 | Пачка | 1 | 295 | 295 |
| Картридж для принтера | Шт | 1 | 2650 | 2650 |
| Программное обеспечение Windows | Шт | 1 | 13000 | 13000 |
| Программное обеспечение Terra | Шт | 1 | 15000 | 15000 |
| Итого: | | | | 30945 |

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (инженера) от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (5.8.1)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (5.8.2)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: 10,4;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (5.8.3)$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (г. Томск).

Таблица 4.12 – Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени | Научный руководитель | Инженер |
|--|----------------------|---------|
| Календарное число дней | 365 | 365 |
| Количество нерабочих дней | | |
| – выходные дни | 118 | 118 |
| – праздничные дни | | |
| Потери рабочего времени: | | |
| – отпуск | 48 | 48 |
| – невыходы по болезни | | |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 247 | 247 |

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$Z_{\text{м}} = 38050 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 64304,5 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{56277 \cdot 10,4}{247} = 2707,6 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 2331,8 \cdot 54 = 146208,1 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для инженера:

$$Z_{\text{м}} = 14874,45 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 25137,8 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{25137,82 \cdot 10,4}{247} = 1058,4 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 1058,43 \cdot 73 = 77265,7 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведем в таблице 5.13.

Таблица 4.13 – Расчет основной заработной платы

| Исполнители | Оклад, руб. | $k_{пр}$ | k_p | $З_m$, руб | $З_{дн}$, руб. | T_p , раб. дн. | $З_{осн}$, руб. |
|-------------------------|----------------|----------|-------|----------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| Научный руководитель | 38050 | 0,3 | 1,3 | 64304,5 | 2707,6 | 54 | 146208,1 |
| Инженер | 14874,45 | 0,3 | 1,3 | 25137,8 | 1058,43 | 73 | 77265,7 |
| Итого: | | | | | | | 223473,8 |

Отразим обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot Z_{осн}, \quad (5.8.4)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды приведем в таблице 5.14.

Таблица 4.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

| Исполнитель | Основная заработная плата, руб. |
|------------------------|---------------------------------|
| Научный руководитель | 146208,1 |
| Инженер | 77265,7 |
| Коэффициент отчислений | 0,302 |
| Итого: | 67489,1 |

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 5.15.

Таблица 4.15 – Расчет бюджета затрат НИТ

| Наименование статьи | Сумма, руб. |
|----------------------------------|-------------|
| Материальные затраты | 30945 |
| Основная заработная плата | 223473,8 |
| Отчисления во внебюджетные фонды | 67489,1 |
| Бюджет затрат: | 321907,9 |

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления). Бюджет затрат составил 321907,9 рублей.

4.9 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин:

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (5.9.1)$$

где Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_{\text{pi}} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (5.9.2)$$

где a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

| Критерии \ ПО | Весовой коэффициент параметра | Текущий проект | Аналог |
|---|-------------------------------|----------------|--------|
| 1. Способствует росту производительности труда пользователя | 0,1 | 4 | 4 |
| 2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей) | 0,1 | 4 | 2 |
| 3. Помехоустойчивость | 0,2 | 3 | 3 |
| 4. Энергосбережение | 0,25 | 5 | 4 |
| 5. Надежность | 0,25 | 4 | 4 |
| 6. Материалоемкость | 0,1 | 5 | 4 |
| Итого: | 1 | 25 | 21 |

$$I_{\text{тп}} = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,1 = 4,15$$

$$I_{\text{аналог}} = 4 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,1 = 3,6$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки $I_{\text{исп.}i}$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p-\text{исп.}i}}{I_{\text{исп.}i}^{\text{финр}}} \quad (5.9.3)$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\begin{aligned} & \mathcal{E}_{\text{ср}} \\ &= \frac{I_{\text{исп.}1}}{I_{\text{исп.}2}} \end{aligned} \quad (5.9.4)$$

Таблица 4.17 – Сравнительная эффективность разработки

| № п/п | Показатели | Разработка | Аналог |
|-------|---|------------|--------|
| | Интегральный финансовый показатель разработки | 1 | 1 |
| | Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки | 4,15 | 3,6 |
| | Интегральный показатель эффективности | 4,15 | 3,6 |
| | Сравнительная эффективность вариантов исполнения | 1,153 | |

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый способ плазмохимического синтеза оксидных композиций является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом, основываясь на показателях эффективности.

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Потенциальными потребителями результатов исследования являются АЭС. Сегментирование рынка осуществляется по следующему критерию: потребность в результате НТИ.

2. В результате проведения анализа конкурентных технических решений сделан вывод о том, что разрабатываемый метод плазмохимического синтеза оксидных композиций является наиболее предпочтительным, чем золь-гель метод.

3. Определены сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы для реализации проекта. По итогам выполнения SWOT-анализа выбраны наиболее эффективные стратегии.

4. Оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации показала средний уровень, который можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта.

5. В процессе планирования научно-исследовательского проекта построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

6. При планировании бюджета рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды. Бюджет затрат составил 321907,9 рублей.

Оценка эффективности исследования показала, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом

5 Социальная ответственность

Целью выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) является моделирование процесса синтеза в воздушной плазме наноразмерных оксидных композиций для уран-плутониевого ДЯТ.

В экспериментальной части ВКР было проведено термодинамическое моделирование процесса плазменной переработки водно-органических нитратных растворов (ВОНР), обеспечивающие прямой синтез в воздушной плазме топливных композиций для уран-плутониевого дисперсионного топлива. По его результатам были определены оптимальные условия для практической реализации процесса: массовые доли раствора и плазмообразующего газа, рабочая температура, давление и удельные энергозатраты.

Выполнение ВКР проводилось в отделении ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ) Инженерной школы ядерных технологий (ИЯТШ) Томского политехнического университета. Для выполнения экспериментальной части ВКР в качестве рабочего места использовался компьютерный стол с ЭВМ, соответствующее периферийное оборудование (монитор, клавиатура, мышь) и программное обеспечение (Microsoft Word, Microsoft Excel, TERRA). Потенциальными пользователями результатов исследования являются АО «Сибирский химический комбинат» и ПАО «Машиностроительный завод» [14].

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация

профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с

вредными и (или) опасными условиями труда.

В трудовом кодексе Российской Федерации говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником [15].

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рабочее место при работе с ПК должно составлять не менее чем 6 м². Выполнение экспериментальной части ВКР проводилось в аудитории 001Б учебного корпуса № 10 ТПУ. Общая площадь аудитории 140,4 м², по 23,4 м² на одного оператора ЭВМ, что соответствует гигиеническим требованиям при работе с ЭВМ. Пространство для ног должно соответствовать следующим параметрам: высота пространства для ног не менее 600 мм, расстояние сиденья до нижнего края рабочей поверхности не менее 150мм, а высота сиденья 420 мм.

Так же предусмотрены следующие требования к организации рабочего места пользователя ПЭВМ: конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Объект исследования представляет собой термодинамическую модель протекания процесса плазменной переработки ВОНР, обеспечивающую синтез топливных композиций. При проведении исследований использовалось лицензионное программное обеспечение, научно-техническая литература и справочные издания. Следовательно, можно сделать вывод, что объект исследования не может создать вредных и опасных факторов.

5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Работа по выполнению экспериментальной части ВКР проводилась при помощи персонального компьютера. При его использовании могут возникнуть различные вредные и опасные факторы. Обеспечение комфортных условий труда в значительной степени оказывает влияние на производительность труда и снижение профессиональных заболеваний. К ним относятся меры, связанные с исключением травматизма, антисанитарии и возгораний. Наиболее вероятные факторы воздействия представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Возможные опасные и вредные факторы

| Факторы | Этапы работ | | | Нормативные документы |
|---------------------------------------|-------------|--------------|--------------|---|
| | Разработка | Изготовление | Эксплуатация | |
| 1.Отклонение показателей микроклимата | + | | | СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным |

| | | | | |
|--|---|--|--|---|
| 2.Превышение уровня шума | + | | | электронно-вычислительным машинам и организации работы». СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к |
| 3.Повышенный уровень электромагнитного излучения | + | | | естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на |
| 4.Недостаточная освещенность рабочей зоны | + | | | рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические |
| 5.Поражение электрическим током | + | | | требования к микроклимату производственных помещений. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно |
| 6.Возгорание | + | | | допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов |

При проведении работ, связанных с теоретическим исследованием, важную роль играет планировка рабочего места. Она должна соответствовать правилам охраны труда и удовлетворять требованиям удобства выполнения работы, экономии энергии и времени инженера.

Основным документом, определяющим условия труда при работе с ПЭВМ, является СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». В правилах указаны основные требования к помещениям, микроклимату, шуму и вибрации, освещению помещений и рабочих мест, организации и оборудованию рабочих мест.

Основными опасными факторами являются опасность поражения электрическим током и возгорание. Исходя из анализа состояния помещения, рабочее место инженера, занимающегося теоретическими исследованиями,

по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности [16].

5.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата

Значимым физическим фактором является микроклимат рабочей зоны (температура, влажность и скорость движения воздуха).

Температура, относительная влажность и скорость движения воздуха влияют на теплообмен и необходимо учитывать их комплексное воздействие. Нарушение теплообмена вызывает тепловую гипертермию, или перегрев.

Оптимальные нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха производственных помещений для работ, производимых сидя и не требующих систематического физического напряжения (категория Ia), приведены в табл. 5.2, в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

Таблица 5.2. Нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха

| Период года | Категория тяжести работ | Температура, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, не более м/с |
|-------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|---|
| Холодный | Ia | 22÷24 | 40÷60 | 0,1 |
| Теплый | Ia | 23÷25 | 40÷60 | 0,1 |

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах представлены в табл. 4.3.

Таблица 5.3. Допустимые величины показателей микроклимата

| Период года | Категория тяжести работ | Температура, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, не более м/с |
|-------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|---|
| Холодный | Ia | 20÷25 | 15÷75 | 0,1 |
| Теплый | Ia | 21÷28 | 40÷75 | 0,1÷0,2 |

5.2.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Источниками света могут быть как естественные, так и искусственные объекты. Естественным источником в помещении служит солнце, искусственными являются электрические лампочки. При длительной работе в условиях недостаточной освещенности и при нарушении других параметров световой среды зрительное восприятие снижается, развивается близорукость, болезнь глаз, появляются головные боли.

По нормативу освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50° до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40°. Коэффициент запаса (K_z) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5% [17].

5.2.2.3 Повышенный уровень шума

Акустический шум является одним из раздражителей организма человека при длительном воздействии. При шумовом воздействии учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, возникают головные боли, ослабляется внимание и замедляются психические реакции, что в конечном итоге приводит к снижению работоспособности человека.

Источниками шума на рабочем месте могут быть различные двигатели и механизмы, используемые в офисной технике. Для категории тяжести работ Ia уровень шума на рабочем месте трудящегося не должен превышать 50 Дб.

5.2.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Основное рабочее оборудование – персональный компьютер, является источником электромагнитного излучения. Как и шум, электромагнитное поле своим воздействием может быть причиной учащенного пульса, дыхания, повышения артериального давления, возникновения головных болей, ослабления внимания и замедления реакции, что снижает общую работоспособность человека. Электромагнитное поле, создаваемое персональным компьютером, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот от 0 Гц до 1000 МГц, и в том числе мощность экспозиционной дозы мягкого рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана при любых положениях ПК не должна превышать 100 мкР/ч [18].

5.2.2.5 Поражение электрическим током

Знание допустимых для человека значений тока и напряжения позволяет правильно оценить опасность поражения и определить требования к защитным мерам от поражения электрическим током.

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека. Под напряжением прикосновения понимается напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек. Нормы предназначены для проектирования способов и средств защиты от поражения электрическим током людей при их взаимодействии с электроустановками. Они соответствуют прохождению тока через тело человека по пути рука-рука или рука-ноги.

Стандарт предусматривает нормы для электроустановок при нормальном (неаварийном) режиме их работы, а также при аварийных режимах производственных и бытовых электроустановок.

Значения напряжения прикосновения и силы тока, протекающего через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме работы

электроустановки, не должны превышать значений, приведенных в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Предельно допустимые значения напряжения соприкосновения и силы тока

| Род и частота тока | Наибольшие допустимые значение | |
|--------------------|--------------------------------|------------|
| | U_{np} , В | I_h , мА |
| Переменный, 50 Гц | 2 | 0,3 |
| Переменный, 400 Гц | 3 | 0,4 |
| Постоянный | 8 | 1,0 |

Для лиц, выполняющих работу в условиях высокой температуры и влажности (относительная влажность больше 75%), эти нормы должны быть уменьшены в три раза.

5.2.2.6 Пожаробезопасность на рабочем месте

Пожар, из-за непосредственной связи с техническими объектами, классифицируют как непреднамеренную чрезвычайную ситуацию техногенного характера.

Пожаробезопасность в производственном помещении направлена на сохранение материальных ценностей, жизни и здоровья людей от неконтролируемого процесса горения. Для определения способов осуществления пожаробезопасности необходимо определить категории помещений определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений и помещений и характеристик проводимых в них технологических процессов. Аудитория 001Б 10 корпуса относится к классу Д – пониженная пожароопасность, так как в помещении находятся негорючие вещества и материалы в холодном состоянии [19].

5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

5.2.3.1 Требования к помещениям для работы с ПЭВМ

В соответствии с помещения для эксплуатации ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь одного рабочего места пользователя ПЭВМ с видеодисплейным терминалом (ВДТ) на базе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) должна составлять не менее 6 м², а для ВДТ на базе плоского дискретного экрана (жидкокристаллический, плазменный) 4,5 м².

5.2.3.2 Микроклимат

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажности воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования.

Радиаторы должны устанавливаться в нишах, прикрытых деревянными или металлическими решетками. При этом температура на поверхности нагревательных приборов не должна превышать 95 °С, чтобы исключить пригорание пыли.

5.2.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы ВДТ были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева. Также как средство защиты для минимизации воздействия фактора следует установка местного освещения из-за недостаточной освещенности, оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей,

внешних козырьков.

Если помещение не соответствует вышеописанным нормам, то это влечет за собой ухудшение здоровья рабочих и как следствие ухудшение рабочего процесса [20].

5.2.3.4 Повышенный уровень шума

В исследовательских аудиториях имеют место шумы различного рода, которые генерируются как внутренними, так и внешними источниками шумов. В рассматриваемом случае внутренними источниками шумов являются рабочее оборудование, а именно персональный компьютер, принтер, вентиляционная система, а также компьютерная техника других инженеров, находящихся в аудитории. При возможном превышении предельно допустимого уровня (ПДУ) достаточно использовать в помещении звукопоглощающие материалы (звукопоглощающая облицовка стен и потолка, оконные шторы). Для уменьшения шума, проникающего снаружи помещения, следует установить уплотнения по периметру притворов дверей и окон.

5.2.3.5 Электромагнитные излучения (ЭМИ)

При возможном превышении ПДУ возможны следующие меры защиты: увеличение расстояния между источником ЭМИ и рабочей зоной, установка отражающих или поглощающих экранов, конструктивное совершенствование оборудования с целью снижения используемых уровней ЭМИ, общей потребляемой и излучаемой мощности оборудования.

5.2.3.6 Поражение электрическим током

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от рода и величины напряжения и тока, частоты электрического тока, пути прохождения тока через тело человека, продолжительности воздействия на организм человека, условий внешней среды.

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения;
- использование устройств бесперебойного питания.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год.

Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования [20].

5.2.3.7 Пожаробезопасность на рабочем месте

Помещение должно быть оснащено системой с дымовыми извещателями. Сигналы извещателей включают систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре для своевременной эвакуации людей.

Выбор типа и расчет необходимого числа огнетушителей производится в зависимости от их огнетушащей способности. Аудитории подходит класс А

(пожар твердых веществ) и класс Е (горение электроустановок).

5.3 Экологическая безопасность

5.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду

В данном подразделе рассматривается характер воздействия разработанной термодинамической модели на окружающую среду. Модель не оказывает воздействия на окружающую среду. Однако, при расчетах и моделировании применялись ПЭВМ и периферийное оборудование. Для соблюдения экологической безопасности использование указанных устройств должно соответствовать требованиям нормативных документов [21].

5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Отработанные люминесцентные лампы являются очень опасным отходом, в них содержится ртуть в газообразном состоянии. Ртуть относится к вредным веществам первой категории, неправильная утилизация сильно отравляет окружающую среду и находящихся рядом людей.

С другой стороны, необходимо также отметить, что после использования компьютерной техники, которая содержит бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы, образуются токсичные отходы, которые не должны попадать на свалку после истечения срока использования, а должны правильно утилизироваться [22].

5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

При перегорании ртутьсодержащей лампы (выходе из строя) её замену осуществляет лицо, ответственное за сбор и хранение ламп. Отработанные люминесцентные лампы сдаются только на полигон токсичных отходов для

захоронения.

- Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:

- Создание комиссии, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники.

- Разработка приказа о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.

- Составление акта утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.

- Формирование приказа на утилизацию.

- Утилизация оргтехники, осуществляемая специализированной фирмой.

После оформления всех необходимых документов, компьютерная техника вывозится со склада на перерабатывающую фабрику. Все полученные в ходе переработки материалы вторично используются в различных производственных процессах [23].

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

Ошибки, допущенные при моделировании процесса плазменной переработки ВОНР, могут привести к следующим авариям при практической реализации процесса:

- возгорание;
- поражение электрическим током;
- воздействие вредных веществ (оксиды азота, углерода, серы).

5.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Основную опасность представляет возгорание. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера.

К причинам неэлектрического характера относятся халатное и неосторожное обращение с огнём. К причинам электрического характера относятся: короткое замыкание; перегрузка проводов; искрение; статическое электричество [24].

Режим короткого замыкания – появление в результате резкого возрастания силы тока, электрических искр, частиц расплавленного металла, электрической дуги, открытого огня, воспламенившейся изоляции. Причины возникновения короткого замыкания: ошибки при проектировании; старение изоляции; увлажнение изоляции; механические перегрузки.

Пожарная опасность при перегрузках – чрезмерное нагревание отдельных элементов, которое может происходить при ошибках проектирования в случае длительного прохождения тока, превышающего номинальное значение [25].

5.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно-техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или

углекислотных огнетушителей [26].

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефонам 01, 101 или 112 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

Выводы

При выполнении раздела «Социальная ответственность» магистерской диссертации были рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя, которые регулируются трудовым кодексом Российской Федерации и СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. Проведен анализ основных вредных и опасных факторов, среди которых: отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, повышенный уровень электромагнитного излучения, недостаточная освещенность рабочей зоны, поражение электрическим током и возгорание. Проведен анализ влияния процесса исследования на окружающую среду, а также рассмотрены мероприятия по предотвращению наиболее вероятных ЧС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Цыканов В.А. Тепловыделяющие элементы для исследовательских реакторов. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2000. – 249 с.
2. Скоров Д.М., Бычков Ю.Ф., Дашковский А.М. Реакторное материаловедение. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 344 с.
3. Бескоровайный Н.М. Конструкционные материалы ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 324 с.
4. Горский В.В. // Атомная техника за рубежом. – 1999. – Т. 10. – С. 9–13.
5. Самойлов А.Г., Каштанов А.И., Волков В.С. Дисперсионные тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1965. – 343 с.
6. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Краснокутский Ю.И., Плазмохимические методы получения порошкообразных веществ и их свойства. // Всесоюзный журнал химического общества им. Д.И.Менделеева. 1991 (2). Т.36. С. 166-170.
7. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Нитридное топливо для ядерной энергетики. – М.: Техносфера, 2013. – 240 с.
8. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
9. Бескоровайный Н.М. и др. Конструкционные материалы ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 324 с.
10. Энциклопедия современной техники. Конструкционные материалы. Т. 2. Гл. ред. А.Г. Туманов. – М.: Советская энциклопедия, 1964.
11. Эйдензон М.А. Магний. – М.: Металлургия, 1969. – 352 с.
12. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Нитридное топливо для ядерной энергетики. – М.: Техносфера, 2013. – 240 с.
13. Холлек Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов. Справочник. Пер. с нем / Под ред. Ивенского Ю.В. –

М.: Металлургия, 1988. – 319 с.

14. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197;

15. СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. «Гигиеническими требованиями к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 15.06.2003 г.;

16. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Стандартинформ, 2016;

17. ГОСТ 30333-2007. Паспорт безопасности химической продукции. Общие требования;

18. ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация – М.: ИПК Издательство стандартов, 1992. – 4 с.;

19. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 13.06.2003 г.;

20. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2008. – 11с.;

21. ГОСТ Р 12.1.009-2009. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения;

22. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

23. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях;

24. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.– М.: Минрегион России, 2016;

25. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки;

26. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003;

Приложение А
(справочное)

**Investigation of plasmachemical synthesis of oxide compositions for
dispersion MOX fuel**

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| 0AM91 | Расторгуев Вячеслав Игоревич | | |

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ОТЯЦ | Каренгин А.Г. | к.ф.-м.н. | | |

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------------|------------------------|---------------------------|---------|------|
| Преподаватель ОИЯ | Шайкина Ольга Игоревна | | | |

A1 Plutonium oxide and mixed uranium-plutonium oxide fuel

Plutonium forms several oxides from PuO to PuO₂. The state diagram of the Pu – O system is distinguished by significant complexity, due to the fact that plutonium, like uranium, forms nonstoichiometric oxides. UO₂ is characterized by a superstoichiometric state with oxygen, and PuO₂ more easily passes into the prestoichiometric state.

In addition to PuO₂, the Pu – O system contains PuO oxide, Pu₂O₃ oxide with a cubic lattice, and Pu₂O₃ oxide with a hexagonal lattice. Results of the recent studies show that PuO₂ does not form a continuous solid solution at temperatures above 1000 °C.

PuO₂ has a fluorite structure which is isomorphic with UO₂. The unit cell contains 4 plutonium atoms and 8 oxygen atoms. The lattice period is 5.396 ± 0.001 Å. Its X-ray density is 11.46 g / cm³. PuO₂ easily loses oxygen at elevated temperatures in inert and reducing media, which is accompanied by the expansion of the unit cell as a result of the formation of the Pu⁺³ ion [1].

This effect is noticeably appeared at temperatures above 1100–1200 °C. After cooling to room temperature, a two-phase product Pu₂O₃ and PuO_{1.98} is formed. This transformation occurs so quickly that a single-phase composition cannot always be fixed by quenching. The lattice period of PuO_{1.98} is 5.398 - 5.400 Å. Heating a mixture of Pu₂O₃ and PuO_{1.98} in air to 800 °C leads to its oxidation to PuO₂.

The isothermal section of the U – Pu – O diagram at room temperature is shown in Figure A1.

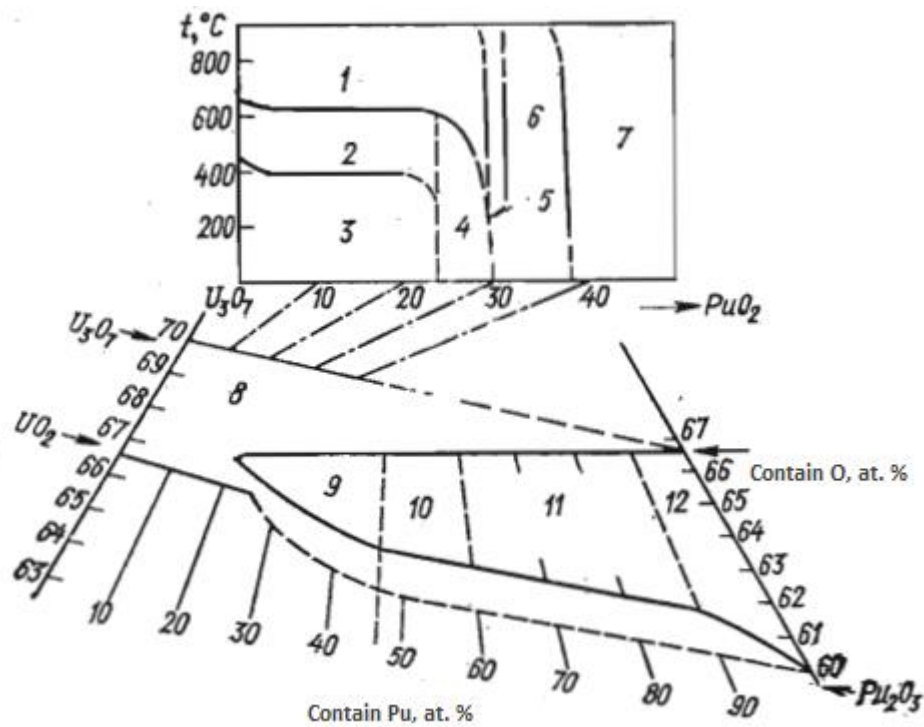


Figure A1. - Isothermal section of the U – Pu – O system at low (room) temperature

These results were obtained for samples slowly cooled to room temperature, then annealed at 200 °C and slowly cooled again.

Prestoichiometric mixed oxides of uranium and plutonium are obtained by partial reduction with hydrogen containing some water. Complete reduction takes place in a pure hydrogen environment. For the ratio $\text{Pu} / (\text{Pu} + \text{U}) > 0.2$, a region with two face-centered cubic phases was found, one of which contains Pu (IV), and the other, probably completely reduced Pu (III). The region extending from the face-centered to the body-centered phase ranges from 45 to 50% PuO_2 .

There is a large single-phase region with a body-centered cube structure within the $\text{Pu} / (\text{U} + \text{Pu})$ ratios of 0.5–0.97. Mixed oxides, reduced in pure hydrogen at 1800 °C, contain a metal phase when cooled under vacuum; under these conditions, U+4 can be restored in accordance with the binary U – O system. This metallic phase is in equilibrium with the face-centered or body-centered phases and, probably, also with the hexagonal phase of the Pu – O system. The investigated binary cross section $\text{U}_3\text{O}_7 - \text{PuO}_2$ is shown in the upper part of Figure A1.

A2 Mixed oxide fuel production

Characteristics of PuO_2 powders, as well as UO_2 depend on the technology of their manufacture and, to a greater extent, on the calcination temperature: its increase leads to a coarsening of the powder: the size of its particles and bulk density increase, and the chemical activity also decreases.

The experience gained in the production of UO_2 products was used in the development of plutonium fuel. All technological processes for the manufacture of plutonium fuel rods are more difficult to carry out, and, therefore, they are more expensive than the corresponding technology for uranium fuel rods. This is due to the presence of direct radiation and the high radiotoxicity of the product. In this regard, using the methods of remote control of the technological process and additional protection from radiation is required. To justify the significant investment in ensuring safe working conditions for personnel, an appropriate capacity for the production of plutonium fuel rods is required: for mixed oxide fuel, it is estimated at about 30 tons / year. Plutonium fuel production costs are projected to increase by about 100% over the current cost of producing fuel from U-235 [2].

A3 Making tablets

Most of the mixed oxide fuel is used in the form of pellets, prepared by pressing and sintering. The following characteristics of the pellets are essential: density, plutonium content, uniformity of plutonium distribution, O / Me ratio, moisture, gas and other metallic and non-metallic impurities content. Much attention is paid to the control of the microstructure of the pellets, on which the radiation behavior of the material depends.

The starting material for the preparation of pellets from a mixed oxide fuel can be prepared by mechanical mixing of UO_2 and PuO_2 powders or by co-precipitation of oxides from aqueous solutions of their salts, for example, from nitrate solutions, followed by reduction of the calcined precipitate. The choice of the method largely depends on the requirements for the microhomogeneousness of the distribution of plutonium in the material and on the physical properties of the

UO₂ and PuO₂ powders.

Mixtures of oxides are obtained by precipitation from solutions of mixtures of ammonium diuranate and plutonium hydroxides, followed by filtration, drying, calcination, reduction in hydrogen to obtain a product with O / Me = 2.00 and agglomeration to ensure the fluidity of the powder.

A continuous process of decomposition of U / Pu nitrates in a fluidized layer has been developed, consisting of two stages: denitration at 375 °C of nitrate solutions to obtain a mixture of UO₃ – PuO₂ powder and subsequent reduction with hydrogen at 600 °C to UO₂ – PuO₂. The product obtained in this way has the following characteristics: an average particle size of 100–500 microns, a slight contamination of the product by the reactor material (the content of nickel, iron and chromium in the product is 5, 50–60 and 4 million, respectively). The pellets, compressed without binder at a pressure of 5700 kgf / cm² and sintered at 1850 °C, they had a density of 87% of theoretical one (TD).

Powders of mixtures of oxides prepared by the method of coprecipitation provide sintered pellets with a high uniformity of plutonium distribution. However, it is believed that this method for the production of fuel on a large scale, for example, for industrial power reactors, is economically less profitable than the method of mechanical mixing of powders of UO₂ and PuO₂ oxides. At the same time, it should be borne in mind that the use of coprecipitated mixtures does not require the complete separation of uranium and plutonium during the reprocessing of spent fuel elements, which will have a favorable effect on the cost of the external fuel cycle [3].

The UO₂ – PuO₂ solid solution formed during sintering of pellets pressed from mechanically mixed powders has some uneven distribution of component concentrations in small volumes, which can lead to deterioration of the neutron-physical characteristics of the reactor core. Additional technological steps to equalize the concentration of components in the fuel increase the cost of the process.

Powders of mixtures of oxides, providing the required density during

sintering, have a small particle size and poor fluidity, therefore, before pressing, they are granulated on automatic presses. For granulation, a wet process can be used, in which an organic binder in the form of a solution is mixed with a powder of oxides and, after drying, is granulated by wiping through a mesh, or a dry process in which the powder is pre-compressed at a pressure slightly lower than in the subsequent compression of tablets, and then granulate. In this case, the granular powder is mixed with a dry binder before pressing the tablets to reduce the friction of the material to be pressed against the walls of the mold and to facilitate the ejection of the pellets from the mold.

The wet granulation process has the following disadvantages:

- 1) The size of the processed batch of the product for the purpose of nuclear safety should be limited, since the added binder solution is a neutron-moderating material;
- 2) The duration of the process increases, due to the fact that the solvent of the binder must be removed at relatively low temperatures, at which there is no significant evaporation of the binder and oxidation of uranium oxide;
- 3) The rate of temperature increase during sintering should be limited, especially in the initial stage, in order to avoid the destruction of the pellets due to too intense evaporation of the binder.

However, rejects during pellets pressing (chips, cracks, taper, barrel shape, etc.) after the wet granulation process are much less common than after the dry one. In this regard, wet granulation is used when high quality tablets are required. Technological processes for pressing pellets from mixed fuel $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ do not differ from similar processes for UO_2 .

The sintering temperature of the pellets is usually 1500–1700 °C. The sintering process improves the homogeneity of the composition, removes volatile impurities, adsorbed gases and organic binder. For the formation of a solid solution (U, Pu) O_2 from mechanically mixed powders of UO_2 and PuO_2 , several hours of exposure are required.

The sintering process is significantly affected by the gas environment, which

is associated with the difference in the affinity of uranium and plutonium to oxygen and hydrogen. Upon sintering in a reducing atmosphere, a two-phase structure of $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ solid solutions is formed, and the composition of the solid solutions depends on the sintering regimes.

During sintering, a tablet density of 93 - 96% of theoretical is usually achieved, but in some cases it is necessary to obtain low-density (87% of theoretical density) pellets from $(\text{U Pu}) \text{O}_2$. In this regard, methods are being developed to control the density of pellets during sintering. One of the methods provides for the development of macroporosity in the sintered material due to the evaporation of organic materials added to it, for example, zinc stearate, however, when using this method, it is difficult to ensure the stability of the final density of the pellets.

A4 Irradiation behavior of PuO_2 and $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$

Significant changes that the mixed oxide fuel undergoes under irradiation, as in the case of UO_2 , are primarily determined by the thermophysical characteristics. Low thermal conductivity of the fuel leads to the emergence of a large temperature gradient in the radial direction of the cylindrical fuel rod. Even with small diameters that the fuel rods of fast reactors have (about 5 mm), temperatures above 2000 °C develop in the center of the fuel with a temperature gradient of about 1000 °C / mm [1468].

The large temperature gradient that develops in the fuel during irradiation contributes to the restructuring of the initial structure of the fuel and the redistribution of its components. With transverse heat removal, not only material transfer and pore migration in the direction of the temperature gradient occur, but also a change in the concentration of U and Pu. The speed and completeness of these processes depend on the irradiation regimes, the initial structure and porosity of the fuel, as well as on its chemical composition.

In mixed oxide fuel with a low concentration of PuO_2 (less than 5%), the rearrangement of the structure occurs without any peculiarities in comparison with UO_2 , since the low content of PuO_2 in the mixture has practically no effect on the

melting temperature, thermal conductivity, and oxygen potential of the fuel. Radially oriented stable grains are rapidly formed at 1700 ° C as a result of intensive movement of pores to the region of higher temperatures along the temperature gradient as a result of evaporation and condensation processes. The formation of a central cavity is a consequence of the migration of pores to the temperature center of the fuel rod core. The kinetics of structure restructuring depends on the initial number of pores in the fuel, and in this regard, there is a difference in the kinetics of restructuring of pellet and vibrocompacted fuel [4].

High heat loads and fuel temperature lead to its melting in the central part. Thus, melting in pellet fuel is observed at a linear power equivalent to 60 W / cm, and at approximately 50 W / cm in vibrationally compacted fuel (the fuel surface temperature is 500 ° C). When examining the microstructure, the molten fuel zone is seen as a well-defined area with a fine-grained structure and spherical or tubular pores oriented in the radial direction.

The restructuring of the fuel structure is accompanied by an increase in its density and, consequently, an increase in thermal conductivity and a change in the temperature profile in the radial direction, and a decrease in the maximum temperature. The calculation results indicate that for various types of initial fuel (pelletized and non-compacted), the maximum temperatures of the fuel rod core and the temperature distribution profile along the radius converge.

With an increase in the concentration of PuO_2 in the mixed fuel, the restructuring of the structure under irradiation occurs more intensively and completely, and, as a result, the temperature of the center decreases. For example, other things being equal, the calculated maximum temperature of the mixed oxide fuel at 623 W / cm in a thermal reactor was 180 ° lower than that of fuel from UO_2 .

Compaction of the mixed fuel during irradiation also occurs in zones that are not subject to structural changes, even at low burnup (up to 30,000 MW / t) and a temperature of 1000 - 1400 K. The volumetric reduction of pores depends on the characteristics of the initial porosity and, therefore, can be controlled during the manufacture of fuel.

There is a high conductivity of the fuel-cladding contact for the vibrocompacted fuel.

In the process of irradiation of the mixed oxide fuel, the redistribution of uranium and plutonium in the fuel rod occurs, primarily in the radial direction. The most probable mechanism for the migration of actinides is the transfer of material in the vapor phase under the action of high temperatures and a temperature gradient. The rate and degree of redistribution depend on the Pu / U ratio in the vapor phase over the condensed fuel and on the presence and nature of porosity. Radial cracks play a significant role in the redistribution of actinides in the direction of the temperature gradient. Migration occurs by selective evaporation of uranium and plutonium from hot pore surfaces and cracks in the fuel and condensation on colder surfaces.

A5 Application of PuO₂ and (U, Pu) O₂ in nuclear reactors

The development of nuclear power has led to an increase in the amount of plutonium produced in water-cooled reactors. For every 4 MW of nuclear power plant capacity, 1 kg of plutonium is released annually. In 1972, for the first time, the world production of plutonium began to exceed the need for it for research and experiments, and in 1975, in all countries with developed nuclear power, the accumulation of plutonium for energy purposes begins. The rate of plutonium production in Western countries will be almost exponential and in the early 1980s will amount to about 100 tons / year of fissile plutonium.

A large amount of plutonium, which is beginning to accumulate, in the near future will make it possible to implement a program for its effective use in light water reactors and, especially, in fast neutron reactors. To implement these programs, plutonium laboratories are being created designed to work with highly active samples and irradiated fuel rods. Research is supported by experiments on irradiation in high flux reactors and in critical assemblies.

A large program for the irradiation of fuel rods with vibrocompacted and pelletized fuel from UO₂ - PuO₂ was carried out at the Saxton reactor (USA). The second load of this reactor contained fuel of the composition UO₂ - 6.6% PuO₂ in

nine assemblies (638 fuel rods), including 490 fuel rods with pellet cores (density $94 \pm 2\%$) and 148 fuel rods with vibrocompacted fuel (density $87 \pm 1\%$); about 1/20 of the fuel rods had 304 stainless steel cladding, and the rest of the zirconium alloy.

The achieved burn-up depth was 29000 MW-d / t for the San Onofre NPP (USA); Since 1970, 734 fuel rods with plutonium-containing fuel have been manufactured. In a boiling water reactor EBWR (USA) for the first time a mixed fuel $\text{UO}_2 - 1.5\% \text{PuO}_2$ was tested in 1966 in the form of fuel rods with a vibrocompacted core in a zirconium cladding. The achieved burnup was 18000 MW -d / t, the linear power of the fuel rods was 1280 W / cm. The third charge of the Holden boiling-water reactor (1967) included experimental fuel rods with a vibrocompacted pelleted core made of $\text{UO}_2 \text{PuO}_2$.

Radiation studies of the behavior of mixed oxide fuel have shown that this fuel is not inferior to UO_2 in its characteristics, and now the technical feasibility of the plutonium cycle in thermal reactors and the creation of an efficient fuel in the form of $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ can be considered proven. Reuse of plutonium in operating water-cooled reactors without changing the core design is currently not difficult.

At present, mixed oxide fuel is being used in fast reactors at nuclear power plants. The fuel with the composition $\text{UO}_2 + (15-20)\% \text{PuO}_2$ is supposed to be used in the BN-350 and BN-600 reactors (USSR). Demonstration NPPs "Phoenix" (France) and PFR (England) were put into operation. The first loading of the reactor included both fuel rods with pelletized and vibrocompacted cores; 4.5 tons of pellets and 0.6 tons of granulate for vibration fuel were produced [5].

The ultimate goal of these works is the creation of economically viable fast reactors with an electrical capacity of 1000–1500 MW. The first batch of rods with fuel in the form of a solid solution $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ for the LMFBR fast reactor (USA) was irradiated to burnup 50,000 MW-day / t in a fast neutron flux in the EBR-II reactor (USA) with a linear heat release of 500-530 W / cm and a maximum sheath temperature of 650 ° C.

References

1. W. Luther, in Industrial application of nanomaterials-chances and risks, W. Luther (Ed.), Future Technologies Division, Dusseldorf, 2004.
2. K.V. Prashant, D. Meisel, Stud. Surf. Sci. Catal. 103 (1997) 237.
3. J.H. Fendler, Korean J. Chem. Eng. 18 (2001) 1.
4. D. Vollath, Nanomaterials: an introduction to synthesis, properties and applications, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
5. M.L. Hitchman, K.F. Jensen, Chemical vapour deposition: principles and applications, Academic Press, New York, 1993.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

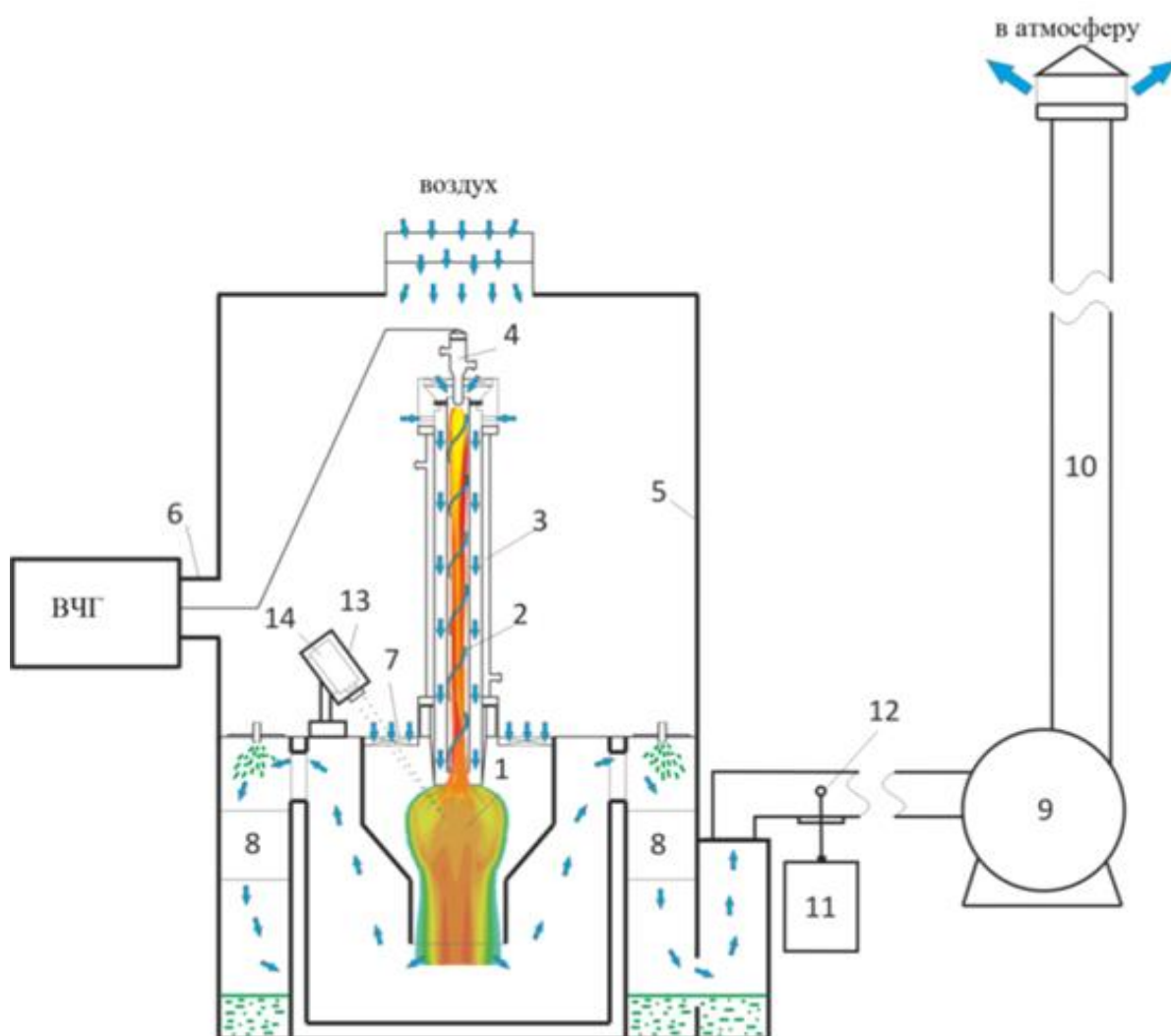


Рисунок Б1 – Схема плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона:

1 – диспергатор, 2 – ВЧФ-разряд, 3 – ВЧФ-плазмотрон; 4 – медный электрод, 5 – корпус; 6 – коаксиальный вывод; 7 – импеллер реактора; 8 – узел «мокрой» очистки отходящих газов; 9 – вытяжной вентилятор (ВР 12-26, №4), 10 – воздуховод, 11 – газоанализатор «Quintox» КМ 9106, 12 – пробоотборник; 13 – защитный кожух пирометра, 14 – пирометр IPE 140/45, ВЧГ – высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13-01.